U. 4. 27

R.C.P. EDINBURGH LIBRARY

TRAVAUX DE L'ASSOCIATION

DE L'INSTITUT MAREY

TRAVAUX DE L'ASSOCIATION

DE

L'INSTITUT MAREY

PAR

MM. CHAUVEAU, KRONECKER, ATHANASIU
WALLER, ERRERA

NATIONAL COLLEGE OF PHYSICIANS, ADINE
LIBRARY.

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN (VIe)

1905

Tous droits réservés.

TRAVAUX DE L'ASSOCIATION

DE L'INSTITUT MAREY

L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE L'INSTITUT MAREY EN 1904

AVANT-PROPOS

Appelé, par le vote unanime de la dernière Assemblée générale de l'Association internationale de l'Institut Marey, à l'honneur de remplacer son fondateur à la tête de l'Association, j'ai accepté cette lourde charge pour obéir au dernier vœu du cher et fidèle ami aux côtés de qui j'avais constamment marché dans ma vie scientifique pendant quarante-quatre ans.

Marey disparaît au moment où sa création commençait à prendre figure et à montrer ce que la science physiologique en peut attendre. Pour continuer l'effort considérable déjà dépensé dans cette création, j'ai besoin du concours de tous. Je suis assuré de celui des membres de l'Association et de tous les admirateurs de Marey, répandus dans le monde entier. Il me faut aussi, en France, l'assistance des pouvoirs publics et de la ville de Paris, qui se sont montrés si bienveillants et si généreux envers Marey et son Institut. J'espère que cette assistance ne me manquera pas.

Ce ne sera point, en tout cas, de mon fait si l'essor de la création de Marey ne prend pas tout le développement qu'il avait rêvé pour elle. Initié à ses ambitions, confident de toutes ses pensées, je m'y conformerai pieusement, dans un esprit de dévouement et de désintéressement absolus.

J'ai voulu commencer mon administration par la publication des premiers travaux de l'Association. Ils ont été réunis dans la présente plaquette. On y verra que la maladie n'a pas empêché Marey de donner aux recherches qui ont été faites dans son Institut la plus vigoureuse et la plus féconde impulsion, grâce au zèle intelligent de ses collaborateurs.

J'ai cru devoir faire précéder les rapports où sont exposées ces recherches de divers documents relatifs à la constitution de l'Association de l'Institut Marey et à son installation matérielle au Parc-des-Princes.

Il était tout indiqué d'y joindre les noms de nos donateurs, sans le concours desquels l'Institut Marey n'aurait pu se constituer.

A. Chauveau.

Paris, 8 mars 1905.

ASSOCIATION DE L'INSTITUT MAREY

Décret accordant à l'Institut Marey la reconnaissance d'utilité publique

CABINET
du
PRÉFET
—
N° 311

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LIBERTÉ — ÉGALITÉ — FRATERNITÉ

PRÉFECTURE DU DÉPARTEMENT DE LA SEINE

Le Président de la République française,

Sur le rapport du président du Conseil, ministre de l'Intérieur et des Cultes;

Vu l'extrait du procès-verbal de la séance, en date du 27 juin 1902, dans laquelle l'Assemblée générale de l'Association de l'Institut Marey a demandé à être reconnue comme établissement d'utilité publique;

Vu l'avis du ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts, en date du 1er décembre 1902;

Vu l'avis du Conseil municipal de Boulogne-sur-Seine du 22 mars 1903;

Vu l'avis du Préfet de la Seine;

Vu la loi du 1er juillet 1901 sur le contrat d'association et le décret du 16 août 1901 rendu pour son application;

Ensemble les pièces du dossier;

Le Conseil d'État entendu;

DÉCRÈTE :

Article premier. — L'Institut Marey, dont le siège est à Boulogne-sur-Seine, est reconnu comme établissement d'utilité publique.

Cette association scientifique sera régie par les statuts annexés au présent décret.

Art. 2. — Le Président du Conseil, ministre de l'Intérieur et des Cultes, est chargé de l'exécution du présent décret.

Fait à Paris, le 30 juillet 1903.

Signé : Émile LOUBET.

Par le Président du Conseil, ministre de l'Intérieur et des Cultes,
Signé : E. Combes.

Pour copie conforme :

Pour le Secrétaire général,
le Conseiller de préfecture délégué,

Meunier.

STATUTS

Rédigés conformément au modèle officiel, par le Conseil d'administration, en vertu des pouvoirs qui lui ont été conférés par l'Assemblée générale pour demander la reconnaissance d'utilité publique.

Article premier. — L'Association de l'Institut Marey, fondée en 1898, a pour but l'étude des moyens propres à rendre comparables entre eux les divers appareils inscripteurs en usage dans les Laboratoires de Physiologie, et d'une manière générale de rendre uniformes les méthodes employées en Physiologie.

Sa durée est illimitée. Elle a son siège à Boulogne-sur-Seine, parc des Princes, avenue Victor-Hugo, sur un terrain contigu à celui de la Station Physiologique.

Art. II. — L'Association se compose exclusivement de membres titulaires. Ils sont nommés par cooptation. Le tiers au moins des membres doit être de nationalité française. Ils paient une cotisation de vingt francs.

Art. III. — La qualité de membre de l'Association se perd par la démission ou par une décision de l'Assemblée générale prise aux deux tiers des voix des membres présents.

Art. IV. — L'Association est administrée par un Conseil d'administration composé d'un Président, un Vice-Président, un Secrétaire et un Administrateur-Trésorier, élus pour cinq ans, par l'Assemblée générale.

Trois membres du bureau au moins doivent être Français. En cas de vacances, le Conseil pourvoit au remplacement d'un ou plusieurs de ses membres, sauf ratification par la plus prochaine Assemblée générale. Les membres sortants sont rééligibles.

Art. V. — Le Conseil se réunit sur la convocation du Président ou sur la demaude du quart des membres. La présence du tiers des membres du Conseil d'administration est nécessaire pour la validité des délibérations.

Il est tenu procès-verbal des séances. Les procès-verbaux sont signés par le Président et le Secrétaire.

Art. VI. — Toutes les fonctions de membres du Conseil d'administration sont gratuites.

Art. VII. — L'Assemblée générale des membres de l'Association se réunit au moins une fois par an sur la convocation du Président ou la demande du quart de ses membres. La moitié plus un des membres est nécessaire pour la validité des délibérations et des décisions.

Son ordre du jour est réglé par le Conseil d'administration. Elle entend les rapports sur les travaux scientifiques faits à l'Institut Marey ou dans les laboratoires des membres de l'Association.

Elle approuve les comptes de l'exercice clos, vote le budget préparé

par le Conseil d'administration sur les propositions du Directeur pour l'exercice suivant, délibère sur les questions mises à l'ordre du jour, et pourvoit au renouvellement des membres du Conseil d'administration.

Ces rapports annuels et ces comptes sont adressés chaque année à tous les membres de l'Association.

Art. VIII. — Les dépenses sont ordonnancées par le Président.

La Société est représentée en justice et dans les actes de la vie civile par l'Administrateur-Trésorier. Le représentant de la Société doit jouir du plein exercice de ses droits civils.

Art. IX. — Les délibérations du Conseil d'administration relatives aux acquisitions, échanges et aliénations des immeubles nécessaires au but poursuivi par l'Association, constitution d'hypothèques sur lesdits immeubles, baux excédant neuf années, aliénation du bien dépendant du fonds de réserve et emprunts, ne sont valables qu'après l'approbation de l'Assemblée générale.

Art. X. — Les délibérations du Conseil d'administration relatives à l'acceptation de dons et legs ne sont valables qu'après l'approbation administrative donnée dans les conditions prévues par l'article 910 du Code civil et les articles 5 et 7 de la loi du 4 février 1901.

Les délibérations de l'Assemblée générale relatives aux aliénations de biens dépendant du fonds de réserve ne sont valables qu'après l'approbation du Gouvernement.

Art. XI. — Le directeur de l'Institut Marey est nommé pour cinq ans par l'Assemblée générale. Il est Président de l'Association. Le premier directeur, M. Marey, est à vie, sauf le cas de démission.

Art. XII. — Le fonds de réserve comprend :

1° La dotation ;

2° Le dixième au moins du revenu net des biens de l'Association ;

3° Les sommes versées pour le rachat des cotisations ;

4° Le capital provenant des libéralités à moins que l'emploi immédiat n'en ait été autorisé.

Art. XIII. — Les ressources de l'Association se composent :

1° Des cotisations ;

2° Des subventions qui peuvent lui être accordées ;

3° Du revenu de ses biens ;

4° Du produit des libéralités dont l'emploi immédiat a été autorisé.

Art. XIV. — Les statuts ne peuvent être modifiés que sur la proposition du Conseil d'administration ou du dixième des membres.

L'Assemblée extraordinaire spécialement convoquée à cet effet ne peut modifier les statuts qu'à la majorité de deux tiers des membres présents.

L'Assemblée doit être composée du quart au moins des membres en exercice.

Art. XV. — L'Assemblée générale appelée à se prononcer sur la dissolution de l'Association, et convoquée spécialement à cet effet, doit comprendre au moins la moitié plus un des membres en exercice. Si

cette proportion n'est pas atteinte, l'Assemblée est convoquée de nouveau, mais à quinze jours au moins d'intervalle, et cette fois elle peut valablement délibérer, quel que soit le nombre des membres présents. Dans tous les cas, la dissolution ne peut être votée qu'à la majorité des deux tiers des membres présents.

Art. XVI. — En cas de dissolution volontaire, prononcée en justice, ou par décret, ou en cas de retrait de la reconnaissance de l'Association comme établissement d'utilité publique, les biens disponibles sont appliqués à une œuvre d'intérêt scientifique désignée par l'Assemblée générale; faute de quoi ils reviennent à l'État français, ministère de l'Instruction publique, enseignement supérieur. Ces délibérations sont adressées sans délai au ministre de l'Intérieur.

Art. XVII. — Les délibérations de l'Assemblée générale prévues aux articles XIII, XIV et XV ne sont valables qu'après l'approbation du Gouvernement.

Art. XVIII. — L'Administrateur-Trésorier qui représente l'Association en justice et dans les actes de la vie civile devra faire connaître dans les trois mois à la préfecture de la Seine tous les changements survenus dans l'administration ou dans la direction.

Les registres et pièces de comptabilité de l'Association seront présentés sans déplacement sur toute réquisition du Préfet, à lui-même ou à son délégué.

Le rapport annuel et les comptes sont adressés chaque année au Préfet de la Seine, au ministre de l'Intérieur et au ministre de l'Instruction publique.

Art. XIX. — Le ministre de l'Instruction publique aura le droit de faire visiter par ses délégués les établissements fondés par l'Association et de se faire rendre compte de leur fonctionnement.

Art. XX. — Un règlement préparé par le Conseil d'administration et approuvé par l'Assemblée générale arrête les conditions de détail propres à assurer l'exécution des présents statuts.

Président : J.-E. Marey. *Vice-Président* : H. Kronecker.

Secrétaire : G. Weiss.

Membres : A. Chauveau, M. Foster, H.-P. Bowditch, L. Fredericq, A. Waller, K. Hurthle, V. Mislawski, A. Mosso.

LISTE DES MEMBRES

DE

L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE L'INSTITUT MAREY

Président :

M. Chauveau, professeur au Muséum, membre de l'Institut.

Vice-Président :

M. Kronecker, professeur à l'Université de Berne.

Administrateur-Trésorier :

M. Maurice Lévy, professeur au Collége de France, membre de l'Institut.

Secrétaire :

M. G. Weiss, professeur agrégé à la Faculté de médecine.

Membres :

MM.

Amagat, membre de l'Institut;

Athanasiu, professeur à l'Université de Bucarest;

Bowditch, professeur à Harward University Boston;

Einthoven, professeur à l'Université de Leyde;

Fredericq, professeur à l'Université de Liége, membre de l'Académie royale des Sciences;

Foster, professeur à l'Université de Cambridge, membre de la Royal Society de Londres;

Grützner, professeur à l'Université de Tubingen;

Hürthle, professeur à l'Université de Breslau;

Langendorff, professeur à l'Université de Rostock;

Lippmann, professeur à l'Université de Paris, membre de l'Institut;

Mislawski, professeur à l'Université de Kasan;

Mosso, professeur à l'Université de Turin, membre de l'Académie des Sciences, sénateur du Royaume d'Italie;

Richet, professeur à la Faculté de médecine;

Schenk, professeur à l'Université de Marburg;

Waller, directeur du laboratoire de Physiologie à l'Université de Londres, membre de la Royal Society.

MM. Marey et Blix, *morts dans le courant de l'année, n'ont pas encore été remplacés.*

LISTE DES DONATEURS

COLLECTIVITÉS

1° État français;
2° Ville de Paris;
3° Academie des Sciences de Paris;
4° Académie des Sciences de Saxe;
5° Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg;
6° Royal Society;
7° Société physiologique de Boston.

PARTICULIERS

1° Prince d'Arenberg;
2° Bischoffsheim;
3° Prince Roland Bonaparte;
4° Carvallo;
5° Chauveau;
6° Dr Javal;
7° Prof. Lannelongue;
8° Mme Mauchaffée (de Troyes);
9° Prof. Richet;
10° Ed. de Rothschild;
11° Sabathé-Dietz;
12° Solvay.

INSTITUT MAREY.

DISTRIBUTION DE L'INSTITUT MAREY

Rez-de-chaussée

A Musée rétrospectif.
B Photographie.
C Électricité.
D Électricité.
E Chambre de travail.
F —

1er Étage

G Bibliothèque.
H Chambre de travail.
I —
I' Petit atelier.
J Chambre de travail.
K —
L —
M —
A_1 Garçon.
B_1 Chambre à coucher.
C_1 —
D_1 Salle à manger.
E_1 Cuisine.
F_1 Chambre de travail.
G_1 Chambre à coucher.

2e Étage

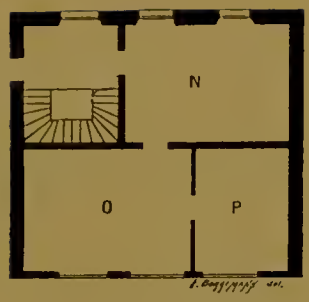
N Salle de dessin.
O Chambre de travail.
P —

Combles

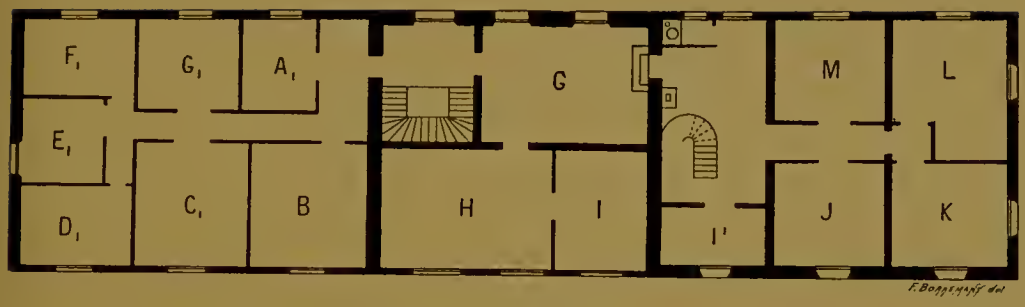
Q R S Débarras.

Sous-sol

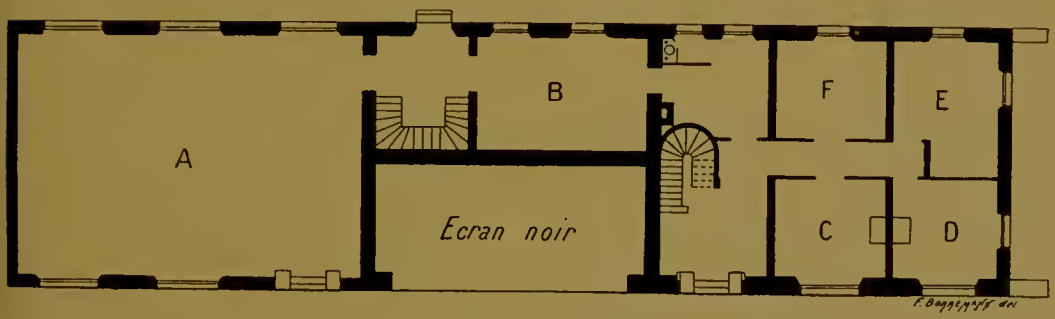
T Machine.
U Accumulateurs.
V Photographie.
X Charbon.
Y Calorifère.



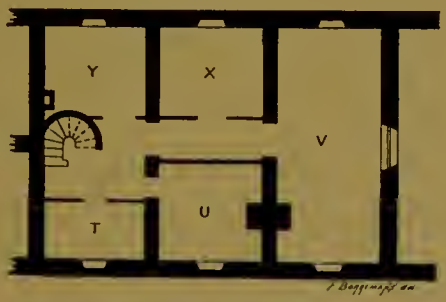
DEUXIÈME ÉTAGE



PREMIER ÉTAGE



REZ-DE-CHAUSSÉE



SOUS-SOL

E.-J. MAREY

Éloge lu en séance générale du 6e Congrès international des physiologistes tenu à Bruxelles, du 1er au 4 septembre 1904

Par **H. KRONECKER**

VICE-PRÉSIDENT DE L'ASSOCIATION

Monsieur le Président,
Mesdames et Messieurs,

Le Comité du Congrès m'a chargé de rendre le dernier hommage à notre membre Marey, parce que, depuis plus de trente ans, nous avons tous deux travaillé dans le même ordre d'idées à perfectionner les méthodes employées en physiologie. J'ai proposé la fondation d'un institut de méthodologie scientifique dans mon rapport sur l'Exposition d'appareils des sciences naturelles, tenue à Londres en 1876. Lors du IVe Congrès des physiologistes, à Cambridge, Marey a plaidé en faveur de la création d'un institut international pour contrôler les appareils employés dans la méthode graphique.

Mais nos relations personnelles sont beaucoup plus anciennes. Il y a quarante-deux ans, le clinicien Traube me présentait à un jeune et jovial médecin de Paris, qui désirait se mettre au courant des méthodes kymographiques introduites en pathologie expérimentale par le célèbre professeur de Berlin.

C'était Etienne-Jules Marey, dont l'Académie des Sciences de Paris venait de couronner les recherches sur les fonctions du cœur

de cheval, entreprises en collaboration avec Chauveau[1]. Ce brillant succès n'empêchait en aucune façon Marey de se confier à la direction d'un modeste étudiant.

Marey est né le 5 mars 1830 à Beaune. Cette ville peut se glorifier de compter parmi ses enfants l'illustre mathématicien Monge, le peintre paysagiste Ziem, le marquis d'Ivry, remarquable compositeur, et Mme Favart, la grande comédienne. Le site pittoresque où se trouve Beaune a dû éveiller de bonne heure en Marey l'amour de la nature. Les beaux tableaux qui ornent l'hôpital n'ont certes pas été sans influence sur la compréhension artistique si éveillée du grand physiologiste. Il doit sans doute un peu de son talent littéraire à sa fréquentation de l'importante bibliothèque municipale. Quant aux savoureux vins de Bourgogne, peut-être ont ils contribué à donner à Marey son agréable gaieté de caractère.

A dix-neuf ans, Marey quitta sa ville natale et se rendit à Paris pour y étudier, sur le conseil de son père, la médecine. S'il avait pu suivre ses goûts, il se serait certes plutôt assis sur les bancs de l'Ecole Polytechnique. Presque tous ses travaux décèlent, en effet, ses préférences pour la mécanique. Les branches des sciences médicales, où elle n'intervient pas, ne l'intéressaient guère. Il ne s'en appliquait pas moins avec persévérance à leur étude, ainsi qu'en témoignent les médailles reçues alors qu'il n'était qu'étudiant et la première place qu'il obtint au concours de l'internat.

A vingt-quatre ans, il recherche dans quelle mesure l'élasticité des artères favorise la circulation du sang. Il trouve qu'« elle diminue les résistances que le sang éprouve à pénétrer dans les artères[2]... » Il arrive, en outre, à conclure que « les artères... réagissent comme des ressorts pour pousser le liquide en avant[3] ».

Dans sa thèse, Marey mentionne que, déjà en 1854, alors qu'il n'avait pas encore commencé ses recherches sur la circulation sanguine, il fut « frappé du tout petit phénomène que tout le monde a dû voir, mais que nous n'avons trouvé consigné nulle part; le voici : en nous grattant la peau du dos de la main avec

1. *Physiologie médicale de la circulation du sang*, par le Dr E.-J. Marey, ancien interne des hôpitaux de Paris, lauréat de l'Institut et de la Faculté de médecine, membre des Sociétés anatomique, de biologie, philomatique, etc. Paris, 1863, chez Adrien Delahaye, p. 46.

2. Recherches sur la circulation sanguine. *Gaz. méd. de Paris*, 1858.

3. *La circulation du sang*. Paris, chez Masson, 1881, p. 158.

les ongles, au lieu de la rougeur qui s'ensuit d'ordinaire, quelques points au contraire devenaient plus blancs que le reste des téguments. Après avoir répété plusieurs fois l'expérience, nous vîmes bientôt que, pour obtenir une trace blanche, il fallait que le frottement fût assez léger; un frottement plus fort amenait, au contraire, une ligne rouge. Mais de chaque côté de cette ligne rouge apparaissait bientôt un liséré blanc, identique à celui que donne un frottement léger[1]. »

En 1860, paraît dans les « Comptes rendus de l'Académie des Sciences » une courte communication, intitulée : « Recherches sur la forme et la fréquence du pouls au moyen d'un nouvel appareil enregistreur des pulsations ». Marey y décrit son *sphygmographe*. Ce fut l'origine de la célébrité de son inventeur. L'esprit ingénieux de Marey avait reconnu les défauts du lourd sphygmographe de Vierordt. Pour y remédier, il remplace la masse inerte dont le poids comprime l'artère par un ressort d'acier qui n'est qu'insensiblement déformé par les pulsations. Un levier inscripteur très léger agrandit notablement les mouvements du ressort et les enregistre sur une plaque mise en marche par un mouvement d'horlogerie. Avec sa loyauté habituelle, Marey s'empresse, d'ailleurs, de reconnaître les mérites de Vierordt. Il s'exprime en ces termes : « Le physiologiste allemand n'en a pas moins la gloire d'avoir donné l'idée première d'un appareil enregistreur qui pourra s'appliquer non seulement en physiologie, mais dans la pratique médicale à laquelle il devra rendre les plus grands services[2]. »

Cette découverte fut le point de départ des belles recherches sur la méthode graphique que Marey poursuivit pendant toute sa vie et qui lui ont valu à juste titre le nom de fondateur de la méthode graphique.

D'après son maître, Beau, le choc cardiaque était dû au brusque agrandissement des ventricules par l'afflux de sang qui leur arrivait des oreillettes. C'est en vue de vérifier expérimentalement cette théorie que Marey entra en relation avec Chauveau. Celui-ci avait acquis de grandes connaissances expérimentales sur les fonc-

1. *Recherches sur la circulation du sang à l'état physiologique et dans les maladies*, 1859, p. 53.

2. *Physiologie médicale de la circulation du sang*. Paris, 1863, p. 50.

tions du cœur de cheval. Il n'eut guère de peine à convaincre Marey que les oreillettes étaient loin de posséder la force nécessaire pour comprimer sensiblement les épaisses parois des explorateurs en caoutchouc. Le travail de Chauveau et Marey montre que le choc cardiaque coïncide avec la systole ventriculaire. Les deux physiologistes français réussirent, en outre, à déterminer exactement la durée de chacune des phases d'action des oreillettes et des ventricules. A la cérémonie de la remise de la médaille offerte à M. Marey, le 19 janvier 1902, Chauveau a narré d'une façon humoristique comment ce travail fut accompli : « Le bon et beau temps que celui de cette collaboration! Elle n'était pourtant pas facile. J'habitais Lyon; vous, Paris. Il fallait se rejoindre et, une fois réunis, se rencontrer au cours de la journée pour les efforts en commun. Nous n'y avions guère de commodité : Chauveau ne travaillait jamais que le matin; Marey ne travaillait jamais que le soir. « Vous fermez quand j'ouvre, me disiez-vous un jour. Comment « arriver à échanger nos idées? » Gros problème à résoudre, en effet! Nous aboutîmes tout de même, malgré ces difficultés et tant d'autres encore que les jeunes générations ne connaissent pas, grâce aux laboratoires bien outillés que leurs prédécesseurs ont réussi à créer pour eux[1]. »

Marey eut l'idée de transmettre les mouvements cardiaques par des tuyaux en caoutchouc à ses capsules à air. C'est ainsi qu'il introduisit cette féconde méthode en physiologie. Il ne manque point en cette occasion de rendre justice à ses devanciers : « L'idée de transmettre un mouvement à distance au moyen de tubes pleins d'air appartient à M. Ch. Buisson. En 1858, nous avions essayé d'obtenir cette transmission à l'aide d'un tube de plomb, muni à ses extrémités d'ampoules semblables à celles qui sont décrites plus haut; mais cet appareil était rempli d'eau au lieu d'air. Lorsqu'une de ces ampoules était introduite dans le cœur par la veine jugulaire, il fallait qu'une force considérable la comprimât, pour que la colonne liquide contenue dans le tube entrât en mouvement et que le levier enregistreur fût soulevé. Le ventricule seul pouvait produire cet effet, tandis que l'action de l'oreillette ne donnait lieu à aucun mouvement du levier qui lui

1. *Hommage à M. Marey.* Paris, Masson, 1902, p. 37.

correspondait. En 1860, M. Buisson imagina un moyen de transmettre au sphygmographe que nous venions de présenter à l'Académie des Sciences les battements des différentes artères sur lesquelles notre instrument ne serait pas applicable. A cet effet, ce physiologiste se servait de deux entonnoirs conjugués, dont un tube de caoutchouc réunissait les becs[1]. »

Dix-huit ans plus tard, il écrit : « Antérieurement à toutes ces expériences, le docteur Upham (de Boston) avait essayé, par un semblable moyen, de transmettre à des sonneries électriques les mouvements extérieurs du cœur : le physiologiste américain expérimenta sur un jeune médecin nommé Groux, atteint d'une division congénitale du sternum, et chez lequel on sentait les battements du cœur très superficiellement, puisque les téguments seuls le recouvraient en certains points. On voit la figure de l'appareil du docteur Upham dans une brochure publiée par M. Groux (*Fissura sterni congenita. New. observ. and experim.* 2e édition, Hambourg, 1859)[2]. »

Ce n'est toutefois pas même M. Upham qu'on doit considérer comme l'inventeur de la transmission par la pression de l'air. Je me rappelle avoir vu vers l'an 1860, à Berlin, dans l'appartement de mon frère, des sonnettes à air de « Toepffer et Schaedel » qui remplaçaient les sonnettes à cordon ordinaires.

En 1854, Galy Cazelat d'une part en France, L. Clarke d'autre part en Angleterre, firent breveter des moyens de faire avancer, par l'air raréfié ou comprimé, dans des tuyaux fermés, des boîtes en fer-blanc qui contenaient des lettres et de petits paquets.

Pour passer des anciens porte-voix étudiés par Biot aux signaux pneumatiques, il n'y avait guère qu'un pas à franchir.

De toutes parts, on accourait pour étudier les méthodes graphiques de Marey. Celui-ci avait installé, en 1864, à ses frais, un laboratoire au cinquième étage d'une maison de la « rue de l'Ancienne-Comédie ». C'était la vieille salle abandonnée de la Comédie-Française. Grâce à des cloisons de bois, Marey l'avait divisée en salles de travail et d'habitation. Il y construisit même une cuisine. Donders vint le voir dans ce laboratoire.

1. *Physiologie médicale de la circulation du sang*, 1863, p. 51.
2. *La circulation du sang*, 1881, p. 84.

En 1867, le Ministre de l'Instruction publique, M. Duruy, lui offrit un laboratoire provisoire au Collège de France. Plus tard, Marey fut nommé professeur d'histoire naturelle des corps organisés au Collège de France. Il succédait à Flourens dans cette chaire. En 1878, il fut élu membre de l'Académie des Sciences de Paris, où il remplaça Claude Bernard. En 1895, il fut appelé à l'honneur de présider cette savante Société.

L'introduction en technique physiologique des rouleaux de papier sans fin, analogues aux bandes employées dans le système de télégraphie Morse, est due à Marey.

Après le sphygmographe et le cardiographe, il inventa le pneumographe, le thermographe, l'odographe. Ce dernier appareil enregistre, au moyen de capsules à air attachées soit aux bottines, soit aux fers à chevaux, les diverses espèces de marche « la longueur et la vitesse du pas ». Ces recherches ont non seulement contrôlé et complété les connaissances dues aux empreintes des pieds, mais elles ont surtout amené à déterminer la durée exacte des diverses phases de ces phénomènes.

L'ouvrage principal de Marey a pour titre : *La méthode graphique dans les sciences expérimentales et particulièrement en physiologie et en médecine*[1]. Les héritiers ont eu la gracieuse attention de me faire cadeau du simple exemplaire broché, qui porte comme dédicace : « A ma chère mère, Marey. »

La plupart des observateurs tâchent d'élucider les problèmes qui les ont attirés, soit en se servant des meilleurs moyens employés dans leur propre sphère d'activité scientifique ou dans des branches voisines, soit en inventant de nouveaux moyens appropriés au but poursuivi. Mais Marey procède en artiste : il recherche les phénomènes qui se prêtent le mieux à la représentation graphique, et se réjouit de constater : « que la méthode graphique étend sans cesse son domaine, s'appliquant à beaucoup de sujets nouveaux[2] ».

Marey possédait du reste un grand talent de sculpteur. Il reproduisit, d'après les photographies prises de divers côtés à la fois, des coureurs, des oiseaux dans les différentes attitudes du vol et

1. Paris, chez Masson (sans date). L'introduction est signée : Paris, le 10 janvier 1878.
2. H. Kronecker : *Bericht über die wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner internationalen Ausstellung im Jahre* 1876. Braunschweig. Vieweg und Sohn, 1881. S. 585.

des chevaux au trot. On lui doit aussi des bustes de marbre de sa famille.

Lorsque Marey observa l'électromètre de Lippmann, les oscillations de la colonne de mercure dues aux différences de tension électrique provenant des battements d'un cœur de grenouille, il eut l'idée de photographier ces oscillations : « A l'oculaire du microscope, mettons une plaque de verre dépoli, nous y verrons une image réelle de la colonne de l'électromètre et des mouvements qu'elle exécute. Substituons à cette plaque dépolie une glace recouverte d'un collodion sensible, nous obtiendrons l'image photographiée de cette colonne de mercure; enfin imprimons à la plaque sensible un mouvement de translation perpendiculaire au sens des mouvements de l'électromètre, et nous aurons la courbe des changements de la tension[1]. » « Ces essais qui sont encore très défectueux d'inscription d'électricité me semblent pleins de promesses pour l'avenir. »

Il réussit aussi à photographier les flammes oscillantes de König[2].

Le miroir tournant de l'appareil de König fut l'origine de la plus belle découverte de Marey, la « chronophotographie ».

En décrivant « le *révolver astronomique* de Janssen, imaginé par ce savant en 1873 et qui était destiné à retracer les phases successives du passage de la planète Vénus sur le disque du soleil » toutes les 70 secondes, il ajoute : « Cette expérience nous a paru être la première réalisation d'une chronophotographie. »

Muybridge avait réussi, en 1878, à San Francisco, à obtenir une série de reproductions photographiques instantanées d'un cheval en plein galop. Marey décrit de la façon suivante la méthode de Muybridge : « Des appareils photographiques multiples, de 12 à 24, suivant le nombre des images que l'on voulait obtenir, étaient disposés en séries et braqués sur une piste où galopait un cheval. Chaque appareil photographique était muni d'un obturateur rapide actionné par un électro-aimant. En parcourant la piste, le cheval rompait successivement une série de fils dont chacun, par sa rupture, déclanchait l'obturateur de l'un des appa-

1. *Méthode graphique*, pp. 329 et 331.
2. *Méthode graphique*, p. 647.

reils. Les choses étaient disposées de telle sorte que, pendant la durée de son parcours, l'animal provoquait la prise successive d'une série d'images instantanées[1].

Marey y joint la description de son procédé trouvé en 1882 : « Chronophotographie sur plaque fixe devant un champ obscur... » « Imaginons qu'un appareil photographique ordinaire soit braqué sur un champ parfaitement obscur et que, devant l'objectif, un disque opaque, percé de petites ouvertures, tourne continuellement. Chaque fois qu'une ouverture passera devant l'objectif, il y aurait admission de lumière, si l'appareil avait devant lui un champ éclairé : mais devant le champ obscur il n'en est pas ainsi; aucune lumière ne pénètre dans l'appareil et au bout d'un certain temps la plaque, soumise au développement, montre qu'elle n'a pas été impressionnée.

« Si, devant le champ obscur, on fait passer un homme ou un animal vivement éclairé, chaque admission de la lumière produit une image de l'animal, et, comme celui-ci se déplace sans cesse, ses images successives se montrent sur la plaque en des points différents et avec des attitudes différentes. »

Marey s'appliquait de prédilection aux problèmes de la vie courante. C'est ainsi qu'il remarque que le « dicton populaire d'après lequel un chat retomberait toujours sur ses pattes » peut être éclairci par la méthode chronophotographique.

Il reconnaît que « si l'on photographie les images à raison de 60 par seconde, on peut les faire passer au devant de l'œil avec une vitesse de 10 seulement à la seconde; cela suffit pour que le mouvement paraisse absolument continu. Mais alors il est six fois plus lent que dans la réalité, et comme, à chaque tour du zootrope, le phénomène se reproduit identique à lui-même, on finit par en saisir tous les détails ».

« L'animal, d'abord courbé de façon que son dos soit fortement convexe et dirigé en bas, redresse sa colonne vertébrale et la courbe en sens inverse; en même temps, une torsion se produit suivant l'axe vertébral, et le couple résultant de l'action musculaire tend à faire tourner la partie antérieure et la partie

1. Exposition d'instruments et d'images relatifs à l'histoire de la chronophotographie par Marey (Exposition universelle à Paris, 1900), pp. 11 et 12.

postérieure du corps en sens contraire l'une de l'autre [1]. »

Marey contrôlait toujours ses chronophotographies en photographiant en même temps une aiguille qui tournait sur un cadran portant 20 divisions. Cette aiguille pouvait faire au maximum un tour en une seconde.

Il installa avec une ingénieuse simplicité un « champ obscur pour la chronophotographie sur plaque fixe » dans sa station physiologique. Il réussit même à obtenir des images en relief : « Si trois chronophotographes sont braqués sur des champs obscurs perpendiculaires entre eux, l'animal représenté sera vu sous trois aspects différents qui permettront de comprendre ses attitudes par rapport aux trois dimensions de l'espace. D'après ces documents, nous avons pu modeler des figures d'hommes et d'oiseaux qui éclairent plus complètement le mécanisme des mouvements [2]. »

A l'aide de son « fusil photographique », Marey parvint à photographier 12 fois par seconde le vol d'un oiseau, le temps d'exposition étant chaque fois de 1/500 de seconde.

Pour éviter toute confusion des images d'hommes ou d'animaux prises à courts intervalles, il inventa un procédé ingénieux : « C'est de ne pas photographier le sujet tout entier mais seulement des points de son corps ou des lignes qui, par leurs positions dans les images, renseignent sur le mouvement que l'on veut connaître. Un homme complètement vêtu de noir, et par conséquent invisible devant le champ obscur, porte sur son corps des points brillants ou des lignes brillantes, petits galons d'argent fixés sur son costume au-devant de l'axe des membres. Ainsi équipé, cet homme passant au-devant de l'appareil donnera des images réduites à de véritables épures géométriques. »

Marybridge, en s'appuyant sur le principe du stroboscope de Plateau (1832), réalisa, au moyen du zootrope, la synthèse des mouvements. Mais c'est Marey qui, se servant du « chronophotographe analyseur et projecteur », réussit en 1893 à obtenir un mouvement régulièrement saccadé des bandes Films et à reproduire fidèlement des mouvements rapides et lents. L'année suivante, il fit cons-

1. *C. R. de l'Acad. des sciences*, t. C, XIX, 29 octobre 1894.
2. *Encyclopaedie d. math. Wiss.*, IV, 2, II, Heft 1, p. 118. Leipzig, 1904.

truire son « chronophotographe microscopique » et son « fusil chronophotographique à bande pelliculaire ».

O. Fischer reconnaît ces recherches comme fondement précieux pour une mécanique comparée de la locomotion des animaux.

Les beaux-arts, eux aussi, doivent de la reconnaissance à Marey.

C'est ainsi que dans son éloge de Marey paru dans le *Photo magazine*, du 17 juin, E. Giard dit : « Il faut alors, grâce à ces empreintes indiscutables, constater l'erreur commune à nos peintres qui figurent pendant sa course l'homme penché en avant : le torse est en réalité rigoureusement droit, sauf pour la traction ou la poussée d'un fardeau, sinon il y a chute. »

Dans un article de l'*Indépendance belge* du 19 mai, intitulé : « Marey et Phidias », le rédacteur C. T. raconte ce qui suit : « Au palais des Académies un officier de cavalerie français... démontra que cinq siècles avant notre ère, Phidias en sa frise du Parthénon[1] avait réalisé ces conclusions esthétiques qui se dégagent des études de M. Marey. Non pas d'instinct seulement, et moins encore par hasard, mais assurément grâce à un génie observateur et déductif qui se conciliait avec sa vocation artiste. »

Plusieurs peintres, parmi lesquels Aimé Morot dans sa charge de Reichshoffen qui est au musée du Luxembourg, s'avisèrent de tourner la difficulté à la lumière des analyses du professeur Marey en codifiant les mouvements isolés dans le spectacle du mouvement d'ensemble, en les précisant tous de telle sorte que chacun d'eux étant représenté dans la masse, cette masse réalisât enfin par le groupement des détails cette synthèse impressionniste que l'œil avait jusque-là gardée pour lui seul, au grand désespoir des artistes et des admirateurs de leurs œuvres.

Et c'était précisément ce qu'avait fait Phidias par un coup de génie sans prendre soin d'en avertir personne.

C'est également à la lumière des analyses du professeur Marey, et avec son concours, que M. Maurice Emmanuel étudia la danse antique et la danse moderne en un livre très remarqué, qu'il résuma, dans une conférence donnée à l'Université de Bruxelles, en montrant dans le « pas » qui orne certains vases grecs ou

1. Les reproductions en grandeur naturelle ornent le mur de l'escalier de l'Institut Marey.

étrusques l'origine, à peine modifiée à travers les siècles, du pas qui se danse encore dans les ballets d'opéra.

Lors de la dernière Exposition universelle de Paris, on pouvait admirer une décoration murale représentant la danse grecque, peinte d'après des chronophotographies par un parent de Marey, M. Noël Bouton.

Giard appelle l'attention sur la concordance qui existe entre les délicats dessins, d'une vivacité si naturelle, peints par les Japonais sur des paravents, et les images chronophotographiques.

Dans son laboratoire privé de Naples, Marey a observé les mouvements des animaux marins.

L'instinct artistique de Marey se décèle dans ses recherches sur l'analyse des mouvements musculaires. On admire dans ses livres de belles séries de tracés qui représentent d'une manière saisissante les modifications de la secousse musculaire sous l'influence de la fatigue. Par une série d'autographies des battements d'un cœur de grenouille sous l'influence des irritations électriques, prises aux diverses phases de la révolution cardiaque, il montre nettement la « phase réfractaire dans laquelle le cœur n'est pas irritable[1] pendant la systole du ventricule ».

Cette observation faisait découvrir le caractère fondamental de l'excitabilité cardiaque. Dans le *British medical Journal* du 28 mai, le nécrologiste de Marey parle ainsi de cette observation : « The immense importance of this phenomenon is obvious, and involves the conclusion that the heart cannot be tetanized as is the case with a skeletal muscle. »

Plus d'un an avant que Marey n'ait publié dans les bulletins de son laboratoire du Collège de France (1878), j'ai décrit avec M. W. Stirling le même phénomène dans le livre jubilaire offert à C. Ludwig[2]. J'ai montré qu'il ne se limite pas seulement à l'état systolique, mais qu'avec le refroidissement du cœur, la phase réfractaire s'étend de la systole à la diastole et même à un repos cardiaque de plus de quatre secondes. Martius[3], dans son travail

1. *La circulation du sang*. Paris, 1881, p. 42.

2. *Das charakteristische Merkmal der Herzmuskelbewegung*. Jubelband für Carl Ludwig, 1874; Neudruck, Leipzig, 1903.

3. Friedrich Martius : *Die Erschöpfung und Ernährung des Froschherzens*. Du Bois-Reymond's Archiv, 1882, Physiol. Abt. S. 545.

sur le cœur, a réclamé nos droits de priorité, et mon ami Marey les a reconnus.

Marey préférait l'échange oral d'idées à l'étude de mémoires imprimés. Son plus grand plaisir était d'expliquer à ses amis les méthodes qu'il venait de découvrir.

Sa manière d'ordonner et de rédiger ses observations était fort originale. Lorsque j'allai le voir dans sa charmante villa Maria au Pausilipe, près Naples, je trouvai les murs de sa grande salle de travail tapissés de tracés et de figures, qu'il destinait à être intercalés dans le texte de sa « Méthode graphique ».

Voici l'opinion de René Quinton dans la *Revue des Idées* : « Les travaux de Marey sont essentiellement la détermination par l'image du phénomène physiologique qui s'inscrit lui-même à tous les moments de sa durée. Si l'esprit qui présida à ces travaux fut un esprit de biologiste, ce fut encore et avant tout... un esprit de mécanicien. » M. Athanasiu[1] le caractérise bien comme « ingénieur de la vie ».

Marey lui-même disait : « Je n'ai que la mémoire de l'œil. Les courbes sont le langage de la nature vivante. Et si quelque mouvement se refuse à être exprimé par une courbe, la chronophotographie offre un moyen plus fidèle encore d'en traduire toutes les phases en des images permanentes. »

On rencontre, d'autre part, — bien que sans doute plus rarement — des hommes qui n'ont d'idées claires que par des équations. Certes, les fonctions sont plus exactement caractérisées par des formules que par des représentations géométriques, nécessairement limitées par nos perceptions visuelles.

Dans une lettre à Alexandre de Humboldt, le génial mathématicien C.-G.-J. Jacobi a caractérisé « die Stellung des Zahlbegriffs in der gesammten Mathematik echt poetisch aber auch genau zutreffend und ganz ähnlich wie Gauss in den Worten : Die Mathematik sei die Königin der Wissenschaften und die Arithmetik die Königin der Mathematik. Diese lasse sich dann öfter herab der Astronomie und andern Naturwissenschaften einen Dienst zu erweisen; doch gebühre ihr unter allen Verhältnissen der erste Rang. Der principielle Unterschied zwischen der Geometrie und

1. Nécrologie de Marey dans *La Nature*, 28 mai 1904.

Mechanik einerseits und zwischen den übrigen hier unter der Bezeichnung Arithmetik zusammengefassten mathematischen Disciplinen andererseits besteht nach Gauss darin, dass der Gegenstand der letzteren, die Zahl, bloss unseres Geistes Product ist, während der Raum, ebenso wie die Zeit auch *ausser* unserem Geiste eine *Realität* hat, der wir a priori ihre Gesetze nicht vollständig vorschreiben können[1] ».

Marey désirait ardemment perfectionner la physiologie au point d'en faire une science exacte. Dans un rapport sur la méthode graphique, il dit : « Notre science est assez avancée pour marcher de pair avec les plus précises; elle doit pour cela employer des instruments irréprochables. Les astronomes et les physiciens s'appliquent avec un soin jaloux à perfectionner leur outillage, à uniformiser leurs unités de mesure, à simplifier leurs méthodes. Nous ne pouvons mieux faire que de les imiter. »

Vous savez que ses propositions ont été adoptées à l'unanimité au IVe Congrès international des physiologistes, à Cambridge. Une Commission internationale fut chargée « de l'étude des moyens de rendre comparables entre eux les divers inscripteurs physiologiques, et d'une façon générale d'uniformiser les méthodes employées en physiologie ». La Ville de Paris a autorisé et subventionné la construction au Parc-des-Princes. L'Etat français a donné une subvention considérable à cet établissement. « L'Association internationale des Académies » a pris l'œuvre sous son patronage et lui donne son appui moral.

Au Ve Congrès des Physiologistes, réuni à Turin en août 1901, le nom d'Institut Marey a été donné à l'établissement nouveau, dont les statuts ont été rédigés conformément à ceux de l'Association internationale des Académies, dont il émane.

Le 30 juillet 1903, le Président de la République française a émis un décret « accordant à l'Institut Marey la reconnaissance d'utilité publique ». Marey fut élu directeur à vie de l'Institut. La première tâche qu'il donna à son distingué collaborateur, M. Athanasiu, fut — acte significatif — *de rechercher les inexactitudes de son propre sphygmographe.*

1. L. Kronecker : Uber den Zahlbegriff. Eduard Zeller zu seinem Doktorjubiläum gewidmet. *Journ. f. reine und angewandte Mathematik.* Bd. 101, Heft 4, S. 338 und 339.

Marey ne devait pas jouir longtemps du couronnement de ses efforts. Une maladie de foie ne lui permit malheureusement bientôt plus de s'occuper de l'Institut. Le 15 mai, la mort mettait fin à ses travaux et à ses espérances.

Nous regretterons souvent notre cher et fidèle ami, au regard parfois sarcastique mais toujours bienveillant. Même pendant ses souffrances, Marey ne cessait de s'intéresser au sort de tous ses amis.

Je n'oublierai jamais les journées passées à diverses reprises dans sa confortable et jolie maison du boulevard Delessert. Elle se trouve dans une admirable position, d'où l'on domine le Champ-de-Mars. Lors de l'Exposition, les lanternes électriques de la Tour Eiffel illuminaient tous les soirs la chambre que j'occupais dans cette hospitalière demeure.

Marey se réjouissait chaque matin lorsque, pendant qu'il déjeunait dans son lit, le roquet Tomy, couché sur la couverture de soie, accueillait par des aboiements le visiteur étranger, tandis que sa nièce, l'infatigable et aimable Mme Francesca Noël-Bouton, triait le courrier et préparait le bain.

Dès que Marey se sentait assez fort pour pouvoir se lever, il m'entraînait à son Institut, au Parc-des-Princes.

Le 4 octobre 1900, notre Association y avait tenu sa séance solennelle et Marey nous avait fait chronophotographier défilant devant le président du Ve Congrès International des physiologistes, Angelo Mosso.

Selon ses dernières volontés, Marey a été incinéré sans aucune solennité. Mais l'ovation que nous lui faisons aujourd'hui répondrait certes à ses idées. Nous garderons fidèlement et avec piété la création de notre ami que nous n'oublierons jamais.

Paris et la France ont érigé l'Institut Marey et l'ont pris sous leur sauvegarde. Les physiologistes de toutes les nations sont invités à venir y travailler au perfectionnement des méthodes physiologiques.

L'article premier du décret du 30 juillet 1903 est le suivant : « L'Association de l'Institut Marey, fondée en 1898, a pour but l'étude des moyens propres à rendre comparables entre eux les divers appareils inscripteurs en usage dans les laboratoires de physiologie et d'une manière générale de rendre uniformes les méthodes employées en physiologie.

Sa durée est illimitée. Elle a son siège à Boulogne-sur-Seine, Parc-des-Princes, avenue Victor-Hugo, sur un terrain contigu à celui de la station physiologique.

D'après l'article XIII, « les ressources de l'Association se composent des subventions qui peuvent lui être accordées et des produits des libéralités dont l'emploi immédiat a été autorisé.

Nous devons adresser tous nos remerciements à l'Etat français, à la Ville de Paris et aux donateurs dont la généreuse intervention a permis la construction et l'installation de l'Institut Marey. La maladie du premier directeur ne lui a pas permis d'inaugurer officiellement l'Institut en rendant hommage à tous les bienfaiteurs de cet établissement, ainsi qu'il l'aurait vivement désiré.

Puisse chaque physiologiste agir dans son pays de manière que l'avenir de cette institution internationale consacrée au travail pacifique soit assuré par les sympathies de toutes les nations civilisées et par les dons des autorités, des académies et des amis de la science ; car ainsi que le répétait souvent notre cher Marey : « La science n'a pas de patrie ! »

Le dernier vœu de Marey fut que son vieil ami, M. Chauveau, lui succédât comme directeur de l'Institut. L'Association l'a élu. M. Chauveau a bien voulu accepter.

TRAVAUX DE L'INSTITUT MAREY

MÉTHODE GRAPHIQUE

Rapport présenté à l'Association de l'Institut Marey

(Séance du 30 août 1904)

Par **J. ATHANASIU**

SOUS-DIRECTEUR DE L'INSTITUT MAREY

Messieurs,

1. — Au dernier Congrès de physiologie qui a eu lieu à Turin, en 1901, vous avez bien voulu poser les bases de votre laboratoire commun et vous l'avez appelé *Institut Marey*. Ayant eu l'honneur de travailler dans cet Institut, je me fais un devoir de vous dire dans cette circonstance combien M. Marey a été sensible à votre témoignage d'estime. En acceptant la direction de votre œuvre, M. Marey lui a consacré toutes ses forces et, jusqu'à son dernier jour, les questions concernant l'organisation et les travaux de cet Institut constituaient son occupation favorite. Malgré l'état toujours inquiétant de sa santé il suivait avec la plus grande attention nos travaux, et les résultats que j'aurai l'honneur de vous exposer sont le fruit de sa haute direction.

Permettez-moi, à cette occasion, d'adresser un respectueux hommage à la mémoire de celui qui fut notre premier Président et notre premier Directeur.

Les travaux que nous avons pu faire jusqu'à présent à l'Institut Marey ont eu pour objet l'étude de la méthode graphique et surtout la branche de cette méthode qui permet aux phénomènes de tracer eux-mêmes leur courbe de transformation.

On sait que les moyens dont on dispose actuellement pour arriver à ce résultat sont au nombre de deux :

1° Le mobile se trouve relié d'une manière quelconque à un style enregistreur. Dans ce cas, une partie de la force de ce mobile est employée à mettre en mouvement ce style et les pièces intermédiaires. Cela constitue l'inscription par style ou *chronostylographie*, expression que nous devons à M. Chauveau ;

2° La courbe du mobile peut être obtenue photographiquement; dans ce cas, elle n'emprunte rien à la force de ce mobile. Cela constitue l'inscription par la lumière ou *chronophotographie*, expression que nous devons à M. Marey. Ces deux méthodes se prêtent un mutuel appui dans l'analyse des phénomènes physiologiques, ce qui nous a conduits à les étudier ensemble.

Le premier problème que cet Institut avait à résoudre était le suivant :

Etudier les appareils inscripteurs employés en physiologie et chercher le moyen de rendre leurs indications comparables.

Pour entreprendre un pareil travail il fallait réaliser deux conditions indispensables :

1° Posséder tous les appareils à étudier;

2° Avoir les installations d'étude nécessaires.

Nous nous sommes trouvés en présence de nombreuses difficultés pour réunir ces deux éléments.

En ce qui concerne les appareils à étudier, nous en avons acheté un grand nombre, et cela, bien entendu, dans les limites de nos moyens. D'autres nous ont été prêtés, et je suis heureux d'exprimer ici toute notre reconnaissance aux physiologistes et aux constructeurs qui nous sont venus en aide.

Quant aux installations d'étude, la chose était encore plus difficile, vu la grande diversité qu'on rencontre parmi les appareils inscripteurs employés en physiologie. Ils sont bâtis sur des principes différents, de sorte qu'une seule installation ne pouvait pas servir à l'étude de tous.

Malgré cela nous sommes arrivés à quelques résultats précis que je me propose de vous exposer.

I

LA CHRONOSTYLOGRAPHIE

2. — Les nombreuses applications de cette méthode à la physiologie et les résultats obtenus sont trop connus pour que j'en parle dans cet exposé.

Cependant il est nécessaire de définir dès maintenant les conditions dans lesquelles le style a été employé pour inscrire un phénomène physiologique. On sait que c'est Ludwig, le premier, qui inscrivit les oscillations de la pression sanguine à l'aide d'un manomètre à mercure muni d'un flotteur et d'un style enregistreur.

Dans ce cas, le mouvement de la colonne sanguine ne subissait aucune amplification. Quand on a voulu se servir de style pour enregistrer d'autres phénomènes physiologiques, on a été obligé de le transformer en levier amplificateur, vu la faible étendue du mouvement à explorer (secousse musculaire, pouls, pulsation cardiaque, etc.).

Ce levier se trouve relié d'une manière assez variable à l'organe qui produit le mouvement. Quelquefois il ne fait que reposer sur cet organe, sans autre force que son poids (ex. : cardiographe pour la grenouille ou la tortue)[1] ; d'autres fois, le levier est muni de pièces (poids ou ressorts) capables d'opposer une force antagoniste à celle développée par l'organe qu'il explore (ex. : myographe, sphygmographe, etc.). Enfin, dans d'autres cas, le levier est relié à une membrane élastique qui, à son tour, reçoit le mouvement par l'intermédiaire d'une colonne d'air ou de liquide (ex. : tambour à levier, manomètre élastique enregistreur, etc.).

Quel que soit le dispositif employé, le levier enregistreur doit être étudié d'abord isolément et ensuite dans les conditions exigées par l'appareil dont il fait partie.

1. Dans son premier modèle de cardiographe pour la grenouille, M. Marey avait employé un lien élastique pour assurer l'appui permanent du levier contre le cœur.

II

3. — Etude du levier enregistreur isolé. Inertie et amplification. — Les physiologistes se sont aperçus que les courbes obtenues à l'aide des appareils enregistreurs peuvent être entachées d'erreurs dues aux appareils eux-mêmes. Nous verrons plus loin comment Marey, Donders, Buisson, etc., ont cherché à connaître jusqu'à quel point les indications de ces appareils étaient fidèles. Mais ces recherches ont porté sur l'appareil enregistreur tout entier (tambour à levier, sphygmographe, etc.), ce qui n'a pas permis de connaître la part de chacun de ses organes constitutifs. Parmi ces organes le levier en est un des plus importants et peut, par son inertie, fausser la courbe du mouvement qu'il doit inscrire.

On sait que lorsqu'un corps se déplace librement dans l'espace, l'inertie est fonction de sa masse. Quand le corps est assujetti à tourner autour d'un axe, l'inertie de chaque particule du corps est en raison directe du carré de sa distance à l'axe. Si l'on désigne par m la masse et par r sa distance à l'axe, le produit mr^2 est ce que l'on appelle le moment d'inertie de cette particule. On sait que le moment d'inertie du corps entier sera la somme des moments d'inertie de toutes ses particules $= \Sigma mr^2$.

Pour un corps homogène ayant une figure géométrique déterminée (cylindre, parallélipipède, sphère, etc.) le moment d'inertie peut être calculé, et l'on trouve dans le traité de Worthington[1] des indications précieuses à ce sujet.

Cela n'a pas toujours lieu pour les leviers inscripteurs employés en physiologie et alors on détermine expérimentalement leur moment d'inertie.

Ainsi Bohr[2], Schenk[3], v. Frey[4], Worthington[5], Otto-Frank[6] ont

1. Worthington (A.-M.) : Dynamics of Rotation; 1902, 1 vol.
2. Bohr (Ch.) : Om en Anvendelse af Momentan fotografien ved muskelfisiologiske Undersögelser. Kopenhagen, 1886, 1 vol.
3. Schenk (F.) : Ueber den Einfluss der Spannung auf die Wärmebildung des Muskels. *Arch. f. gesam. Physiol.*, 1892, 51, 514.
4. Frey (v.) : Ein Verfahren zur Bestimmung des Trägheitsmoments von Schreibhebeln. *Arch. f. Anat. u. Physiol.*, 1893, 485-490.
5. *Loc. cit.*
6. Otto-Frank : Kritik des elastischen Manometer. *Zeitsch. f. Biol.*, 1903, 44, 445-614.

indiqué différentes méthodes pour trouver le moment d'inertie du levier. Dans un travail récent Otto-Frank[1] a étudié plusieurs questions concernant le levier inscripteur à savoir : le moment d'inertie (suivant la forme géométrique du corps), la charge supportée par l'axe, la charge supportée par le point d'application de la force (suivant l'amplification), la flexion que le levier peut subir en mouvement, etc.

L'étude du levier enregistreur en mouvement a attiré toute notre attention. Elle a été faite avec la collaboration de M. F. Cellerier qui a bien voulu se charger de l'étude mathématique dont il sera question dans ce chapitre[2].

Toutes les fois qu'une vitesse est communiquée à un levier enregistreur, celui-ci peut acquérir une certaine force d'inertie susceptible d'entacher d'une erreur d'ordonnée la courbe qu'il doit décrire. Lorsque le levier ne suivra pas fidèlement le mobile à étudier, nous dirons qu'il y a *discordance.*

Notre but a été de déterminer :

a) Les éléments de la discordance initiale;

b) La grandeur de l'erreur et les éléments dont elle dépend;

c) Les conditions que le levier enregistreur doit remplir pour que ses indications soient admissibles.

a) **Détermination des éléments de la discordance initiale.** Supposons pour fixer les idées, un levier (L) (fig. 1) se déplaçant dans un plan vertical et indépendant. Soit (O) l'axe de rotation horizontal de ce levier qui reçoit le mouvement du corps rigide (S) au point (M) et qui inscrit par l'extrémité (A) la courbe du mouvement. Le corps (S) n'est autre chose qu'un fléau rigide, muni d'un plateau (N) à une extrémité et supportant à l'autre extrémité le petit levier (L). Quand le système est en équilibre, le levier (L) est horizontal. Si l'on applique au plateau (N) une force dirigée de haut en bas, le fléau va s'incliner d'un certain angle et il va communiquer au petit levier (L) une vitesse donnée. Tant que

1. Otto-Frank : Principien der Konstruktion von Schreibhebeln. *Zeitschrif. f. Biol.*, 1904, 45, 480-496.

2. Cellerier (F.) : Etude sur les erreurs d'inscription des leviers enregistreurs. Paris, *Revue de Mécanique*, janvier 1905.

cette vitesse sera croissante, le levier (L) sera poussé et il y aura contact permanent entre lui et l'extrémité du fléau qui lui communique le mouvement. Supposons que le fléau s'arrête brusquement ou que sa vitesse passe par un brusque maximum, les deux leviers se sépareront, il y aura discordance.

D'une manière générale, considérons un levier enregistreur quelconque et soit V la vitesse du corps en mouvement et v la vitesse du point M du levier. Supposons que la vitesse V passe par un maximum et devienne $V_1 < V$. Nous allons chercher à partir de quel moment le levier va se séparer du corps. Cela se produira lorsque la diminution de vitesse du corps dans un temps dt après,

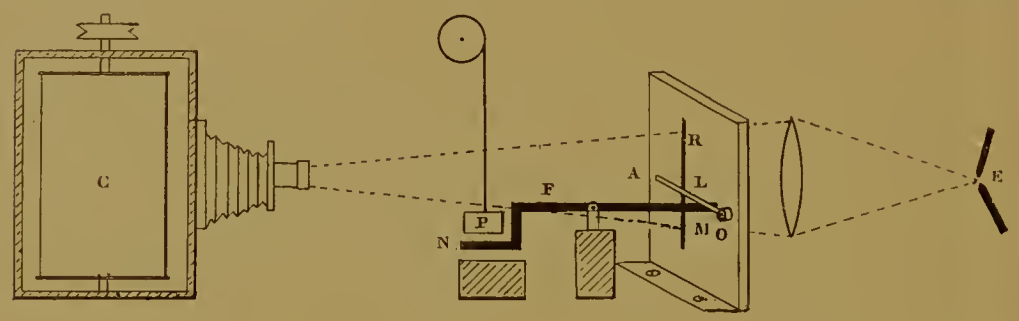


Fig 1. — Schéma de l'appareil qui a servi pour l'étude du levier isolé. — L, Levier à étudier. — O, son axe de rotation. — F, Fléau. — M, Point du contact entre le levier (L) et le fléau (F). — N, Plateau sur lequel tombe le poids (P) : Celui-ci est maintenu à l'aide d'un fil à une hauteur connue. — R, Fente photographique. — E, Lampe électrique. — C, Cylindre couvert d'une pellicule sensible et tournant d'un mouvement uniforme. On photographie l'ombre du point du levier (L) qui se déplace derrière la fente (R).

sera devenue supérieure à la diminution de vitesse du levier dans le même temps dt. Or, la variation de vitesse d'un point dans l'instant dt n'est autre chose que son accélération. Par conséquent, si nous désignons par γ l'accélération du corps à l'instant cherché, par G l'accélération propre du point M du levier, la discordance commencera au moment où l'on aura :

$$\gamma < G.$$

Il convient de bien remarquer que γ est, au moment de cette discordance initiale, de même sens que la pesanteur; quant à G, c'est l'accélération du point M du levier, due à la pesanteur et aux forces antagonistes (s'il y en a).

b) **Détermination de la grandeur limite de l'erreur.** Reprenons le

levier (L) représenté par la figure 1, et communiquons lui en un de ses points une vitesse donnée par la chute du poids (P) dans le plateau (F). La force vive que ce levier va acquérir dépend de *son moment d'inertie*, de *son amplification* et *de la vitesse qui lui est communiquée*. En laissant constants deux de ces éléments on peut étudier la variation de la force vive en fonction du troisième. Si on exécute des expériences en faisant varier seulement l'amplification on voit par la simple inspection de la figure 2 que la force vive du levier croît comme le carré de l'amplification.

On constate de même, que pour une amplification constante, la

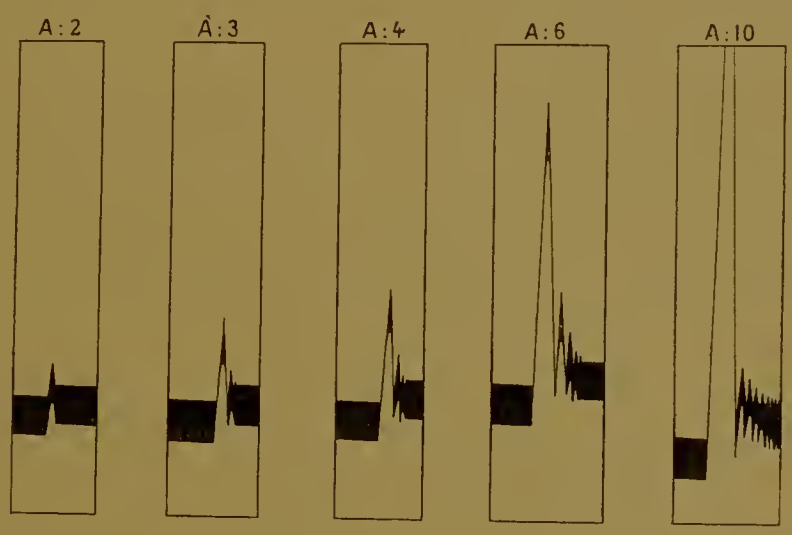


Fig. 2.

force vive d'un levier croît comme le carré de la vitesse angulaire,

Cette force vive acquise par le levier est donc la cause de l'erreur d'ordonnée de la courbe décrite par lui.

La valeur limite de cette erreur chaque fois qu'il y a discordance a été déterminée pour chaque genre de levier enregistreur par les considérations mécaniques suivantes :

Soit (fig. 3) :

π, le poids du levier supposé rigide ;

O, l'axe de rotation horizontal du levier ;

OL et OL', deux positions infiniment voisines du levier dans son mouvement pendant la discordance ;

α et $\alpha + d\alpha$, les angles de OL et OL' avec l'horizontale OH ;

OA_1, la position du levier au commencement de la discordance ;

V_1, la vitesse du déplacement du point du contact M à cette position comptée perpendiculairement à OA_1;

OA_2, la position extrême du levier correspondant au moment où il s'arrête pour redescendre aussitôt;

α_1 et α_2, les angles de OA_1 et OA_2 avec l'horizontale;

G, le centre de gravité du levier;

l, la longueur OG;

L, la longueur totale du levier OA;

N, l'amplification ou rapport $\frac{OA}{OM}$;

F, la composante normale au levier, de la force antagoniste correspondant à l'angle α;

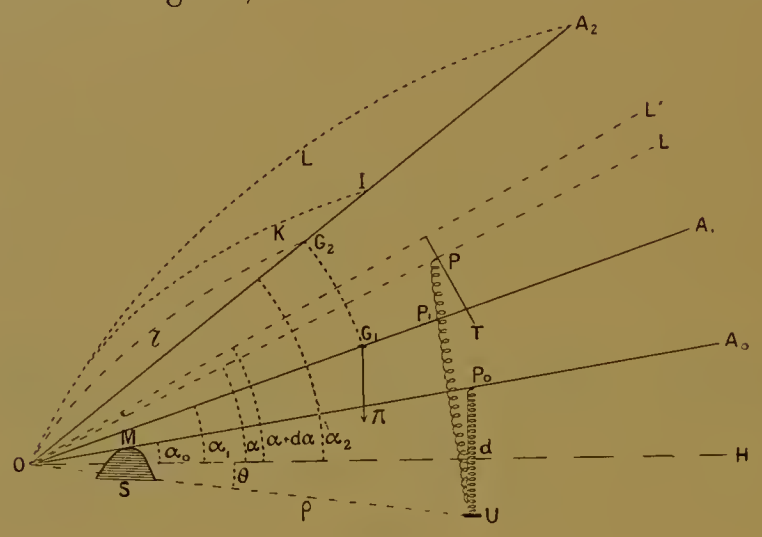


Fig. 3.

λ, la distance de son point d'application P à l'axe O.

Appliquons le théorème général des forces vives entre les positions OA_1 et OA_2 :

La variation de force vive du levier de la position initiale OA_1, *à la position finale* OA_2 *est égale à la somme des travaux des forces qui agissent sur le levier pendant le même temps.*

La force vive du levier OL faisant l'angle α avec l'horizontale est :

$$\mathcal{E} = \Sigma \frac{1}{2} m \left(r \frac{d\alpha}{dt} \right)^2.$$

Si l'on désigne par I le moment d'inertie du levier par rapport à l'axe de rotation :

$$I = \Sigma m r^2,$$

on a donc :

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} I \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2.$$

Or à la position initiale OA_1 on a :

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = \frac{V_1}{OM_1} \quad \text{ou} \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \frac{N}{L} . V_1.$$

Et comme à la position limite OA_2 la vitesse en chacun des points du levier est nulle, la variation de force vive entre les positions OA_1 et OA_2 est par suite :

$$\Delta\mathcal{T} = \frac{1}{2} I \frac{N^2 V_1^2}{L^2}. \qquad (1)$$

Evaluons maintenant le travail élémentaire entre les deux positions infiniment voisines OL et OL'. Il sera la somme des travaux élémentaires des forces agissant sur le levier, les unes dues à la pesanteur, les autres dues à la force F (s'il y en a une).

Le levier étant supposé rigide, le travail dû à la pesanteur sera :

$$d\Gamma_1 = \pi \cos \alpha . l d\alpha.$$

Celui dû à la force F sera :

$$d\Gamma_2 = F . \lambda . d\alpha.$$

La somme des travaux élémentaires de OA_1 à OA_2 est par suite :

$$\Delta T = \pi l \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos \alpha . d\alpha + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F . \lambda . d\alpha,$$

ou :

$$\Delta T = \pi l (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F . \lambda . d\alpha. \qquad (2)$$

En égalant les seconds membres de (1) et (2) on en déduit la relation générale :

$$\frac{1}{2} I \frac{N^2 V_1^2}{L^2} = \pi l (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F . \lambda . d\alpha. \qquad (3)$$

Nous allons appliquer cette relation (3) aux leviers enregistreurs

afin de déterminer la grandeur de l'erreur d'inscription verticale. Appelons Σ cette erreur. Plusieurs cas peuvent se présenter :

1° *Le levier enregistreur est indépendant.* La force F étant constamment nulle on déduit de la relation (3) :

$$\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 = \frac{1}{2}\frac{I}{\pi l}\frac{N^2 V^2_1}{L^2} \tag{4}$$

Nous reportant à la figure 3, on voit que :

$$\Sigma = A_2P_2 - A_1P_1 = A_2Q,$$

donc :

$$\Sigma = L(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1).$$

La relation (4) devient :

$$\frac{\Sigma}{L} = \frac{1}{2}\frac{I}{\pi l}.\frac{N^2V^2_1}{L^2},$$

d'où :

$$\Sigma = \frac{1}{2}\frac{I}{\pi L l}.N^2V^2_1.$$

Si l'on désigne par K le rayon de giration du levier par rapport à l'axe de rotation O, on peut écrire l'équation précédente.

$$\Sigma = \frac{1}{2g}.\left(\frac{K^2}{Ll}\right).N^2V^2_1. \tag{5}$$

qui montre que Σ est proportionnel à $\frac{K^2}{Ll}$, à N^2 et à V^2_1. Dans les leviers minces pour une valeur donnée de L, $\frac{K^2}{Ll}$ est aussi petit que possible; ces leviers conviennent donc pour obtenir des erreurs faibles.

Il résulte de ces considérations :

Dans un levier enregistreur indépendant, l'erreur d'inscription verticale maxima est proportionnelle aux carrés de l'amplification et de la vitesse correspondant à la discordance initiale.

Un levier enregistreur à tige mince donne des erreurs moindres que s'il est à tige volumineuse. L'erreur est indépendante de la densité de la matière du levier.

Dans le cas où le levier est homogène et mince, à section circulaire ou rectangulaire, on a :

$$L = 2l \text{ et } K^2 = l^2 + \frac{l^2}{3} = \frac{4}{3} l^2$$

et la formule (5) devient

$$\Sigma = \frac{1}{3} \frac{N^2 V^2_1}{g}. \qquad (6)$$

Dans un levier enregistreur indépendant, mince et homogène, l'erreur maxima est en outre indépendante de la longueur et du poids du levier.

2° *Le levier enregistreur est pourvu d'une force antagoniste constante.* Dans ce cas F et γ sont constants et la relation (3) devient en posant $F = P$

$$\frac{1}{2} I \frac{N^2 V^2_1}{L^2} = \pi l (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + P\lambda (\alpha_2 - \alpha_1).$$

Or on a ;

$$\Sigma = L (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)$$

et si l'on suppose que l'erreur Σ soit petite de manière à pouvoir confondre $\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1$ avec $\alpha_2 - \alpha_1$ on pourra écrire la relation précédente :

$$\frac{1}{2} I \frac{N^2 V^2_1}{L^2} = (\pi l + P\lambda) \frac{L}{\Sigma},$$

d'où :

$$\Sigma = \frac{1}{2} \frac{I N^2 V^2_1}{L (\pi l + P\lambda)}.$$

Comme précédemment, désignons par K le rayon de giration du levier par rapport à l'axe de rotation, il vient finalement :

$$\Sigma = \frac{1}{2g} \frac{K^2}{L\left(l + \frac{P}{\pi}\lambda\right)} . N^2 . V^2_1. \qquad (7)$$

Dans un levier enregistreur pourvu d'une force antagoniste constante, l'erreur maxima verticale est proportionnelle aux carrés de l'amplification et de la vitesse V_1 correspondant à la discordance initiale. Elle diminue quand le rapport $\frac{P}{\pi}$ de la force antagoniste au poids du levier augmente et quand la distance du point d'appli-

cation de cette surface à l'axe croît. On a tout intérêt à prendre un levier mince.

Dans le cas où le levier est homogène, mince, en posant $\frac{\lambda}{l} = \mu$, on trouve en simplifiant

$$\Sigma = \frac{1}{3}\frac{N^2V^2}{g} \cdot \frac{1}{1 + \mu\frac{P}{\pi}} \tag{8}$$

tout à fait comparable à la formule (6) obtenue dans le cas du levier indépendant.

L'erreur est donc diminuée par l'introduction du poids dans le rapport

$$\frac{1}{1 + \mu\frac{P}{\pi}}.$$

3° *Le levier enregistreur est pourvu d'un ressort.* Quand la force antagoniste du levier est donnée par un ressort à boudin il faut déterminer le travail de résistance qu'introduit le ressort de la position initiale OA_1 à la position limite OA_2.

Soit (fig. 4) :

U, l'extrémité fixe du ressort;

$\widehat{UOH} = \theta$, l'angle de OU avec l'horizontale OH;

$\rho = OU$;

OL, une position intermédiaire du levier entre OA_1 et OA_2;

$\widehat{LOH} = \alpha$, l'angle de LO avec l'horizontale;

P, l'extrémité du ressort qui appuie sur le levier;

$OP = \lambda$;

PT, la normale en P au levier;

R_0 et R, les forces en grammes qui équilibrent le ressort à une position repère OA_0 et à la position OA;

d, la longueur du ressort IP_0 à la position repère OA_0;

k, le coefficient d'élasticité du ressort ou nombre de grammes nécessaires pour produire un allongement de 1 centimètre.

Il faut introduire dans la relation générale (3) le travail du ressort de la position OA_1 du levier à la position OA_2.

Si l'on admet que le ressort est perpendiculaire au levier, on trouve après simplification :

$$\Sigma = \frac{1}{2g} \cdot \frac{K^2}{L\left[l + \frac{k\lambda}{\pi}(\rho - d) + \frac{R_0\lambda}{\pi}\right]} N^2 V^2_1. \qquad (9)$$

Si le levier est mince et homogène

$$K^2 = \frac{4}{3} l^2$$

Posant

$$L = 2l$$

$$\frac{\lambda}{l} = \mu \quad \text{et} \quad R_1 = 1 + \mu\frac{k}{\pi}(\rho - d) + \rho\frac{R_0}{\pi} > 1,$$

on trouve :

$$\Sigma = \frac{1}{3}\frac{N^2 V^2_1}{g} \times \frac{1}{R_1} \qquad (10)$$

tout à fait comparable à la formule (6) obtenue dans le cas du levier indépendant.

On voit qu'il suffit de connaître la constante R_1 du ressort pour avoir les erreurs aux diverses vitesses et avec des amplifications différentes.

Dans un levier enregistreur à ressort à boudin l'erreur est proportionnelle aux carrés de l'amplification et de la vitesse du corps correspondant à la discordance initiale. Elle diminue quand la puissance du ressort et la distance de son point d'application à l'axe augmentent.

L'erreur est R_1 fois plus petite que celle obtenue dans les mêmes conditions de vitesse et d'amplification, le levier étant indépendant.

Quand la force antagoniste du levier est donnée par un ressort à lame, on évalue d'une manière analogue le travail dû au ressort; en désignant par α_0 l'angle que fait le levier avec l'horizontale (fig. 4) pour une position initiale donnée, par R_0 la force initiale correspondante du ressort, par k sa puissance, par C le cosinus de l'angle UPO.

On trouve

$$\Sigma = \frac{1}{2g} \cdot \frac{K^2}{L\left[l + \frac{4kC\lambda^2}{\pi}(\cos\alpha_0 - \sin\alpha_0) + \frac{C\lambda R_0}{\pi}\right]} N^2 V^2_1. \qquad (11)$$

Si le levier est mince et homogène en posant

$$\frac{\lambda}{l} = \mu \quad \text{et} \quad R_2 = 1 + \frac{\mu C R_0}{\pi} + 4\mu \frac{k C \lambda}{\pi} (\cos \alpha_0 - \sin \alpha_0) > 1,$$

on a comme valeur limite de l'erreur :

$$\Sigma = \frac{1}{3} \frac{N^2 V^2_1}{g} \times \frac{1}{R_2},$$

tout à fait comparable à la formule (10) obtenue dans le cas du levier muni d'un ressort à boudin.

R_2 est une constante du levier pour une force donnée. *L'erreur*

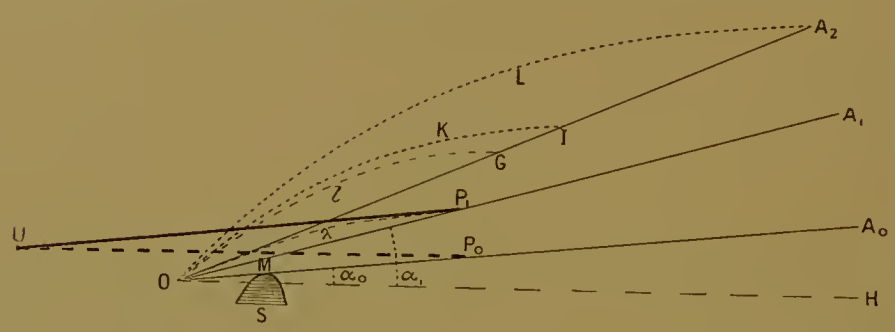


Fig. 4.

est donc R_2 fois plus petite que celle obtenue dans les mêmes conditions de vitesse et d'amplification, le levier étant indépendant.

c) **Conditions que le levier enregistreur doit remplir pour que ses indications soient précises. Amplifications limites pratiques.** Quand on connaît la grandeur limite de l'erreur de l'ordonnée du levier libre, ou du levier pourvu d'une force antagoniste, il est de la plus haute importance de pouvoir déterminer l'amplification dont on peut user pour une vitesse donnée. Nous nous imposons une erreur d'inscription inférieure à une valeur Ω en rapport avec le degré de précision que comporte le résultat à obtenir. Il faudra donc que la valeur de Σ satisfasse à la condition :

$$\Sigma \leqslant \Omega.$$

1° *Levier enregistreur libre.* L'erreur Σ est donnée par la relation (5).

$$\Sigma = \frac{1}{2g} \cdot \frac{K^2}{L.l} \cdot N^2 V^2_1.$$

Pour que cette erreur soit admissible, il faudra que

$$\frac{1}{2g}\cdot\frac{K^2}{L.l}.N^2V^2_1 \leqslant \Omega,$$

d'où l'on tire :

$$N \leqslant \frac{\sqrt{2gL.l.\Omega}}{K.V_1}.$$

V_1 est la vitesse de déplacement au moment de la discordance initiale, et nous avons fait remarquer qu'elle était inférieure à V vitesse maxima. Donc, si nous remplaçons V_1 par V, et si nous déterminons un nombre n tel que

$$n = \frac{\sqrt{2g\Omega l}}{KV}, \qquad (12)$$

nous serons sûrs en prenant une amplification $N \leqslant n$ d'avoir un levier donnant des résultats admissibles. n est donc *l'amplification limite maxima* que l'on peut donner à un levier pour une erreur *admissible* d'inscription Ω et une vitesse maxima V. Les quantités L, l, K seront aisées à obtenir d'après la forme et les dimensions du levier. La vitesse V peut être obtenue facilement de la manière suivante :

Ayant pris la phase ascendante d'un tracé quelconque, il suffit de prendre parmi les tangentes à la courbe celle qui fait le plus grand angle avec l'axe de x, la tangente trigonométrique de cet angle nous donnera une quantité proportionnelle à la vitesse maxima que nous cherchons.

Ce procédé graphique est des plus simples à appliquer si l'on remarque que le point où la vitesse est maxima correspond à un point d'inflexion de la courbe pour lequel la tangente est nettement traçable.

La vitesse maxima V du corps peut être obtenue aussi par une mesure directe approximative, qui sera en général suffisante dans la pratique.

Quand le levier est homogène et mince, ce que l'on doit rechercher,

$$L = 2l$$

$$K^2 = \frac{4}{3}l^2$$

la relation (12) devient :

$$n = \frac{\sqrt{3g\Omega}}{V} \quad \text{(unités C. G. S.)}. \tag{13}$$

L'amplification limite est donc indépendante de la longueur du levier et par conséquent du poids, inversement proportionnelle à la vitesse maxima et proportionnelle à la racine carrée de l'erreur admissible.

Dans la pratique, les leviers indépendants ne conviennent que pour des vitesses inférieures à 2 centimètres par seconde.

2° *Levier à force antagoniste constante.* La relation (7) donnera d'une manière analogue :

$$n' = \frac{\sqrt{2g\Omega L.l\left(1 + \frac{P\lambda}{\pi l}\right)}}{KV},$$

n' étant l'amplification limite maxima pour ce dispositif de levier.

Si l'on pose :

$$\frac{\lambda}{l} = \mu,$$

on peut écrire :

$$n' = \frac{\sqrt{2g\Omega L.l}}{KV} \times \sqrt{1 + \mu\frac{P}{\pi}}.$$

Si le levier est homogène on aura :

$$n' = \frac{\sqrt{3g\Omega}}{KV} \times \sqrt{1 + \mu\frac{P}{\pi}}. \tag{14}$$

Le maximum d'amplification pratique du levier enregistreur à force antagoniste constante est

$$\sqrt{1 + \mu\frac{P}{\pi}}$$

fois plus grand que celui du même levier sous la force antagoniste P, dans les mêmes conditions de vitesse et d'amplification.

3° α) *Levier à force antagoniste fournie par un ressort à boudin.* En se reportant à la relation (9) on en déduit dans le cas général :

$$n'' = \frac{\sqrt{2g\Omega L.l}}{KV} \times \sqrt{1 + \mu\frac{k(\rho - d)}{\pi} + \mu\frac{R_0}{\pi}}. \tag{15}$$

Quand le levier est mince et homogène on a :

$$n'' = \frac{\sqrt{3g\Omega}}{V} \times R_1, \tag{16}$$

en posant :

$$R_1 = \sqrt{1 + \mu\frac{k(\rho - d)}{\pi} + \frac{\mu R_0}{\pi}}.$$

L'amplification limite est inversement proportionnelle à la vitesse maxima et proportionnelle à la racine carrée de l'erreur admissible; elle est R_1 *fois plus grande que si le levier était indépendant.*

β) *Quand la force antagoniste est fournie par un ressort à lame,* on a dans le cas général :

$$n''' = \frac{\sqrt{2g\Omega Ll}}{KV} \times R_2 \tag{17}$$

et si le levier est mince et homogène on a :

$$n''' = \frac{\sqrt{3g\Omega}}{V} \times R_2 \tag{18}$$

dans laquelle :

$$R_2 = 1 + \mu\frac{CR_0}{\pi} + 4\mu\frac{kC\lambda}{\pi}(\cos\alpha_0 - \sin\alpha_0).$$

L'amplification est R_2 *fois plus grande que si le levier était indépendant.*

Exemple. Soit à déterminer l'amplification limite d'un levier à ressort à boudin enregistrant des mouvements dont la vitesse maxima soit approximativement connue, 5 centimètres par seconde.

Nous prendrons un levier mince, homogène, rigide, en aluminium, par exemple. Donnons-nous les diverses valeurs numériques suivantes en unités C. G. S. se rapprochant de celles d'un sphygmographe.

$$V = 5 \text{ cm.}$$
$$\pi = 0 \text{ gr. } 5.$$
$$l = 5 \text{ cm.}$$
$$R_0 = 100 \text{ gr.}$$
$$k = 200 \text{ gr.}$$
$$d = 3 \text{ cm.}$$
$$\mu = \frac{\lambda}{l} = \frac{1}{2}.$$
$$\rho = 3 \text{ cm. } 9.$$
$$g = 981.$$

et admettons une erreur $\Omega = 0^{cm}01$.

En portant ces nombres dans la formule (16) relative aux ressorts à boudin, nous trouvons :

$$n'' = \frac{\sqrt{3\omega\Omega}}{V} \times 17.$$

Si le ressort n'existait pas, l'amplification maxima serait seulement :

$$n = \frac{\sqrt{3\omega\Omega}}{V} = 1{,}08.$$

Cette amplification est donc devenue dix-sept fois plus grande par l'introduction du ressort, et sa valeur est

$$n'' = 1{,}08 \times 17 = 18{,}35.$$

L'erreur admissible sur la courbe enregistrée étant $0^{cm}01$ correspond à une erreur du mouvement du corps étudié de $\frac{0^{cm}01}{N} = \frac{5}{100}$ de millimètre.

D'autre part, si la courbe enregistrée a une amplitude de 1 centimètre, l'erreur relative d'inscription sera $\frac{1}{100}$.

Vérification expérimentale. La théorie des leviers enregistreurs exposée plus haut a été établie en négligeant les résistances créées par le frottement des pivots et en supposant le levier dans le vide. Quand on opère dans l'air, le poids du levier est

$$\pi_1 = \pi\left(1 - \frac{0{,}001293}{d}\right)$$

en désignant par π son poids, par d sa densité dans le vide. C'est ce nombre qu'il faut substituer à la place de π dans les formules précédentes.

Comme le poids π_1 ainsi obtenu est plus petit que π, que d'autre part les résistances du pivot et de l'air agissent en diminuant l'erreur, les formules trouvées sont acceptables à *fortiori*.

A l'aide du dispositif expérimental représenté par les figures 5 et 6, nous avons pu procéder à la vérification de ces formules générales.

Ainsi le levier à étudier (L) reçoit le mouvement donné par une came d'excentricité connue et l'on peut faire varier la vitesse du

mouvement, l'amplification du levier et la force antagoniste. Celle-ci est donnée par un ressort à boudin (R) dont la force élastique est mesurée préalablement.

Les nombres trouvés ont été comparables à ceux fournis par l'application des formules de M. F. Cellerier.

4. — Le cas du levier isolé et recevant le mouvement d'un corps rigide ne se présente que très rarement dans les appareils employés en physiologie. Il se trouve généralement assujetti au corps élastique, donc déformable, qui lui communique le mouvement. Quelquefois le levier est attaché à ce corps, comme cela a lieu dans le tambour à levier; d'autres fois, il est maintenu en contact avec lui à l'aide d'une force antagoniste (poids ou ressort) et les sphygmographes en offrent des exemples. Dans tous les cas, il s'établit une relation assez étroite entre l'organe qui communique le mouvement au levier et celui-ci; de sorte que la forme du tracé obtenu dépend forcément de divers éléments :

1° La rigidité du corps sur lequel repose le levier;

2° Le poids et l'amplification du levier;

3° La forme et la rapidité du mouvement.

Avant d'entrer dans l'analyse de ces éléments, nous allons décrire l'appareil qui nous a servi aussi bien pour ce genre d'expériences que pour l'étude de divers instruments inscripteurs à levier amplificateur.

III

5. — Appareil pour l'étude des inscripteurs a style. — L'étude de ces instruments comprend deux épreuves : une à l'*état statique* dans laquelle on cherche les conditions d'équilibre de leurs organes et des forces qu'ils peuvent déployer; l'autre, à l'*état dynamique* qui va nous montrer la manière dont ils se comportent quand on leur communique un mouvement de forme connue.

C'est surtout l'épreuve dynamique qui demande une installation toute spéciale. Il s'agit, en effet, de produire un mouvement de forme connue dont la rapidité puisse être modifiée à volonté et de communiquer ce mouvement, *sans altération aucune*, à l'appareil qu'on étudie. Après de nombreux essais, nous sommes

arrivés à constituer cette installation telle que les figures 5 et 6 la montrent.

Soit une came de profil connu (fig. 5 C) placée sur un axe horizontal (fig. 6 N) qui reçoit le mouvement du moteur électrique (M). Ce moteur fait en moyenne 600 tours par minute, et peut produire un travail de 22 kilogrammètres. L'induit, équilibré avec une grande précision, et doué d'une vitesse de rotation relativement faible, est dépourvu de vibrations propres. La transmission du mouvement du moteur aux autres organes se fait par courroie pour éviter les vibrations que les meilleurs engrenages engendrent quand il s'agit de grandes vitesses. D'autre part, l'emploi de courroies plates reposant sur des surfaces dépolies rend très difficile le glissement qui serait à redouter dans ce mode de transmission.

Une poulie B (fig. 6), placée sur l'arbre du moteur, transmet le mouvement à la plus grande poulie du cône V (fig. 6). Cette dernière poulie, ayant un diamètre double de celui de la précédente, fera en moyenne 300 tours par minute. Du cône V, le mouvement est transmis à la poulie V′ placée sur l'arbre de la came. Cette poulie peut se déplacer sur cet axe et se mettre en relation avec toutes les poulies du cône V. On a de cette manière la possibilité de faire varier la vitesse de rotation de la came entre 30 et 300 tours par minute. Sur la came repose un levier rigide *a* (fig. 5) muni d'un galet, et le contact entre la came et le galet est assuré par un ressort. Ce levier suit donc en tout point le profil de la came, et, si on le fait inscrire sur un cylindre placé en face, on a le tracé type de la came, ou, en d'autres termes, la forme du mouvement qu'elle produit. Nous avons employé les trois formes de mouvement (fig. 7) données par les trois cames.

La came A, qui est un excentrique régulier, produit un mouvement sinusoïdal; la came B, qui est une spirale d'Archimède, produit un mouvement dont la phase ascendante est très lente et régulière, alors que la phase descendante est brusque; enfin, la came C, taillée d'après un tracé du pouls et rendue encore plus accidentée, produit un mouvement très complexe.

C'est à ces courbes que nous allons comparer toutes les autres qui seront données par les appareils à étudier.

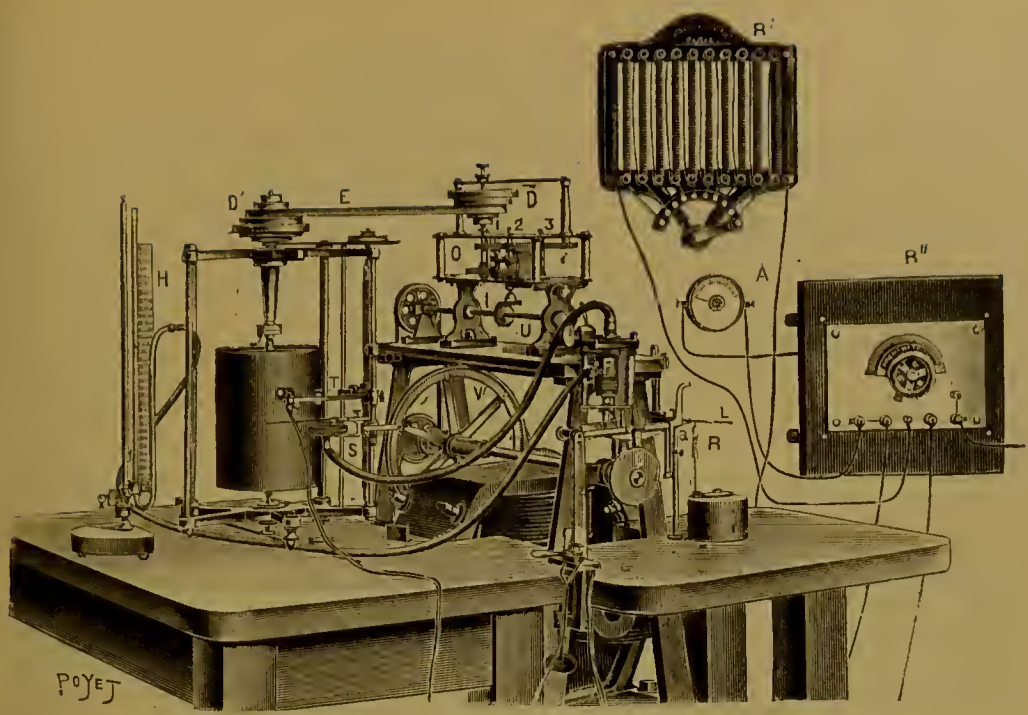


Fig. 5.

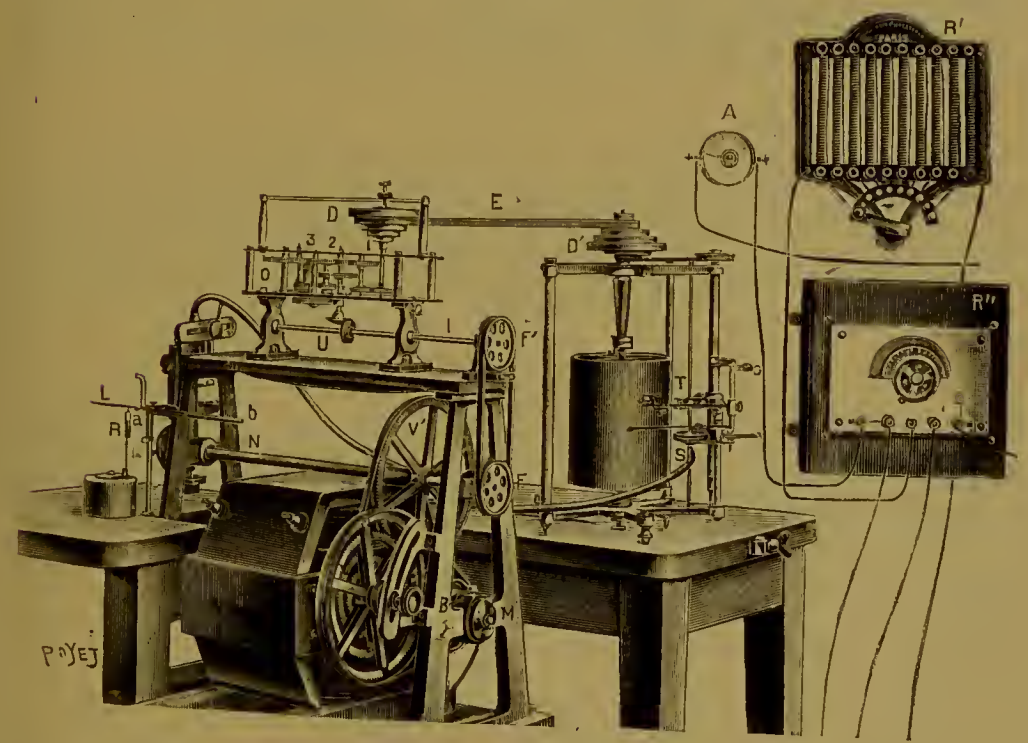


Fig. 6.

Fig. 5 et 6. — *Appareil pour l'étude des inscripteurs à style.* — M, Moteur électrique. — C, Came. — *a*, Levier rigide reposant sur la came par l'intermédiaire d'un galet. — N, Axe horizontal qui porte la came (C) et la poulie (V'). — V, Cône de poulie intermédiaire entre la poulie (B) placée sur l'arbre du moteur et la poulie (V'). — F et F'. Poulies servant à transmettre le mouvement de l'arbre de la came au rouage (O). — V, Engrenage d'angle). — D et D', Cônes de poulies destinées à transmettre le mouvement du rouage O au cylindre enregistreur. — P, Pompe dont le piston est actionné par le levier (*a*). — S, Tambour à levier en relation avec la pompe (P). — T, Chronographe électrique en relation avec une pendule battant la seconde. — R' et R'', appareil pour la mise en marche du moteur. — H, Manomètre à eau.

Pour que cette comparaison puisse se faire exactement, il faut que ces courbes présentent des proportions définies entre leurs éléments essentiels : l'*amplitude* et la *durée*. Dans nos expériences, nous avons rendu égaux ces deux éléments. Mais l'amplitude est fonction de la came, tandis que la durée est fonction du cylindre enregistreur. Pour que lesdites proportions se gardent quelle que soit la rapidité du mouvement, il faut rendre solidaires l'une de l'autre la marche de la came et celle du cylindre enregistreur.

Cette idée, que nous devons à M. Weiss, se trouve réalisée dans notre installation, ainsi qu'on peut voir sur les figures 5

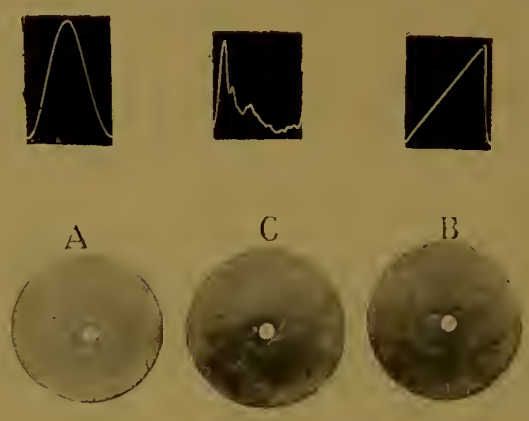


Fig. 7. — Les cames et les formes des mouvements qu'elles produisent.

et 6. A l'extrémité de l'axe qui porte la came, se trouve une poulie (F) (fig. 6) qui transmet le mouvement au rouage (O) par l'intermédiaire d'un engrenage d'angle (U). De cette manière, la vitesse que l'on communique au rouage (O) sera toujours celle de la came. Les engrenages de ce rouage réduisent cette vitesse à $\frac{1}{40}$ (axe n° 3), à $\frac{1}{400}$ (axe n° 2) et à $\frac{1}{4.000}$ (axe n° 1). Sur ces axes peut se placer un cône de poulies (D), d'où le mouvement est transmis par l'intermédiaire de la courroie E à un autre cône de poulies placé sur l'axe du cylindre enregistreur. Cette disposition permet de varier la vitesse du cylindre enregistreur entre des limites assez étendues.

En R′ et R″ se trouvent les appareils pour la mise en marche du moteur M.

Le rouage O peut s'incliner autour de l'axe I et, dans ce cas, le cylindre enregistreur est horizontal.

Sur le bâti du cylindre se trouve un chariot qui porte les appareils inscripteurs : T (chronographe) et S (tambour à levier) ou autres. Ce chariot reçoit le mouvement par le cône de poulies D'.

Le mouvement du cylindre enregistreur est très uniforme,

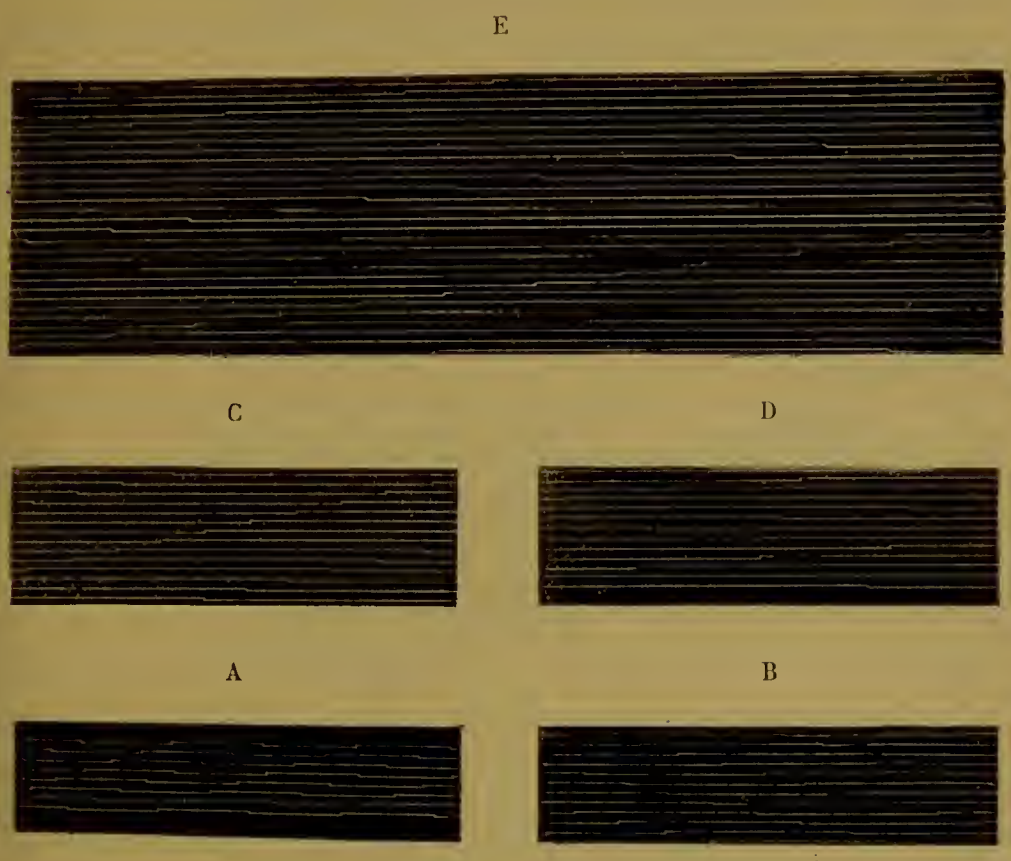


Fig. 8. — Tracés chronographiques pour montrer que la marche du cylindre enregistreur est très uniforme pour les différentes vitesses : A, 2cm,45 ; B, 4cm,90 ; C, 8cm,33 ; D, 16cm,00 ; E, 25cm,00, par seconde.

aussi bien pour les faibles vitesses que pour les grandes. La figure 8) montre assez clairement cette uniformité dans la marche du cylindre enregistreur même à une vitesse de 25 centimètres à la seconde (E).

IV

6. — Etude du levier amplificateur dans les conditions exigées par les appareils dont il fait partie. Elasticité du corps qui lui communique le mouvement. — On sait que dans les appareils enregistreurs à style, celui-ci se trouve relié de différentes manières au corps qui lui communique le mouvement. Ce corps peut être plus ou moins élastique. Nous avons cherché à déterminer la part de ce corps dans la forme du tracé décrit par un levier auquel il a communiqué un mouvement de forme connue.

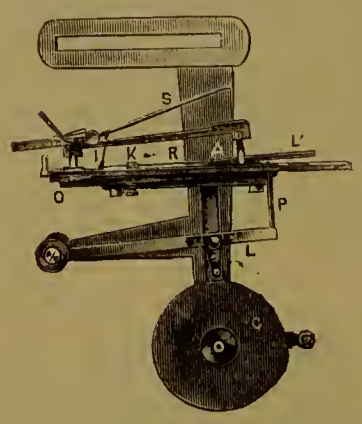


Fig. 9. — *Dispositif expérimental pour l'étude du levier enregistreur solidaire du corps qui lui communique le mouvement.* — C, Came. — L, Levier rigide reposant sur la came. — L', 2e levier rigide en relation avec (L) par l'intermédiaire de la tige (P). — R, Lame de ressort. — K, Curseur permettant de régler la longueur de la lame élastique (R) sur laquelle repose le levier enregistreur (S).

La figure 9 montre le dispositif expérimental que nous avons employé pour ce genre d'expériences. Soit la came C et le levier rigide L de l'appareil que nous avons décrit plus haut. Ce levier communique son mouvement par l'intermédiaire de la tige P à un second levier L' rigide aussi, et qui tourne autour de l'axe O. La face supérieure de ce levier est échancrée pour recevoir une lame de ressort R dont une des extrémités (A) est fixée sur le levier L' et dont l'autre est libre. Un curseur K permet de régler à volonté la longueur de la lame de ressort sur laquelle repose le style enregisteur S par l'intermédiaire de la petite tige I. Quand ce curseur est au bout libre de la lame de ressort, le style enregistreur repose sur un corps rigide. La petite tige I peut être déplacée sur le style enregistreur S et on peut de cette manière modifier l'amplification de celui-ci. Le style S inscrit directement sur le cylindre enregistreur qui n'est pas représenté sur la figure 9.

Prenons la came qui donne le mouvement le plus compliqué, celui qui se rapproche du tracé du pouls, et rendons solidaires le

style enregistreur S et le curseur K. Nous nous trouvons dans le

FIG. 10. — Tracés obtenus avec le levier reposant sur un corps rigide dont il est rendu solidaire. A, Amplification; Longueur du levier, 12 centimètres; Poids du levier, 0 gr. 75.

cas du levier reposant sur un corps rigide. On fait varier la rapidité du mouvement et l'amplification du levier enregistreur.

On voit (fig. 10) que la forme du mouvement[1] est très fidè-

FIG. 11. — Tracés obtenus avec le levier reposant sur un corps élastique auquel il est attaché. — A, Amplification; Longueur du levier, 12 centimètres; Poids du levier, 0 gr. 75.

lement reproduite à faible comme à grande fréquence si l'am-

1. Dans tous nos tracés, le temps (secondes) est marqué en haut ou en bas des courbes.

plification du levier ne dépasse pas 20. Avec une amplification de 50 et à grande fréquence la forme est légèrement altérée par les déformations du levier enregistreur lui-même. Si maintenant on éloigne le curseur K vers l'extrémité fixe de la lame du ressort et si l'on rend solidaires le levier enregistreur et le bout libre de cette lame de ressort on voit (fig. 11) que pour les mêmes fréquences et pour les mêmes amplifications du levier la forme du mouvement est profondément altérée.

Ce n'est que pour l'amplification 10 et pour les deux premières fréquences que la forme du mouvement est assez fidèlement reproduite. Dans tous les autres tracés le mouvement est très différent de celui donné par la came et il est certain que l'élasticité du corps sur lequel repose le levier et la force d'inertie de celui-ci réagissent l'une sur l'autre pour composer ce mouvement.

Ce fait est de la plus haute importance pour l'inscription des phénomènes physiologiques à l'aide des leviers amplificateurs.

Pour pouvoir tirer un parti sérieux de cette méthode, il faut connaître préalablement et d'une manière au moins approximative la rapidité et la forme du mouvement à explorer ainsi que le degré d'élasticité du corps sur lequel repose le levier pour régler en conséquence l'amplification de celui-ci.

7. — Dans ces expériences, le levier enregistreur était attaché au mobile. Ce cas se rencontre dans les appareils physiologiques, comme le tambour à levier par exemple. Mais il y a des

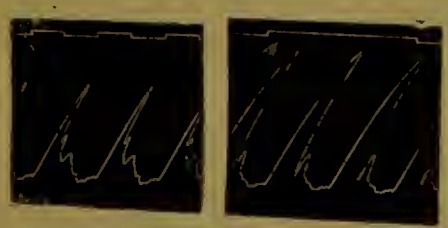


Fig. 12. — Tracés obtenus avec le levier reposant sur un corps rigide. La force antagoniste est un poids de 50 grammes. — Amplification du levier, 30.

appareils dans lesquels le levier est seulement en contact avec ce mobile, et il y est maintenu à l'aide d'une force antagoniste (poids ou ressort) comme c'est le cas des sphygmographes. Nous allons réaliser cette condition à l'aide du dispositif précédent et en reliant

le levier soit à un ressort de sphygmographe, soit à un plateau destiné à recevoir des poids. La figure 12 montre comment ce levier traduit la forme du mouvement qui lui a été communiqué par un corps rigide, quand il est maintenu en contact avec ce corps au moyen d'un poids (50 grammes). La figure 13 représente le tracé

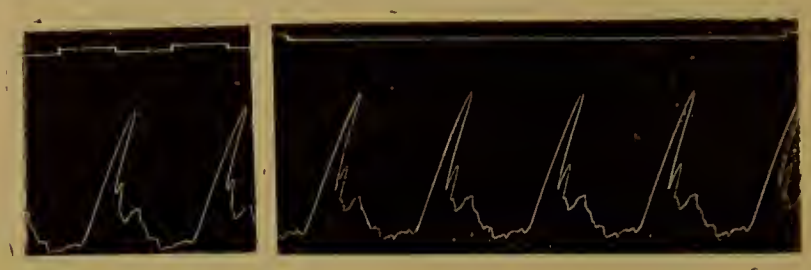


Fig. 13. — Tracés obtenus avec le levier reposant sur un corps rigide. La force antagoniste est un ressort à lame du sphygmographe Marey. — Amplification du levier, 30.

donné par le même levier et dans les mêmes conditions d'amplification et de fréquence, et où la force antagoniste est un ressort.

Dans ce dernier cas la forme du mouvement est assez fidèlement reproduite même à des fréquences très grandes (4 par seconde),

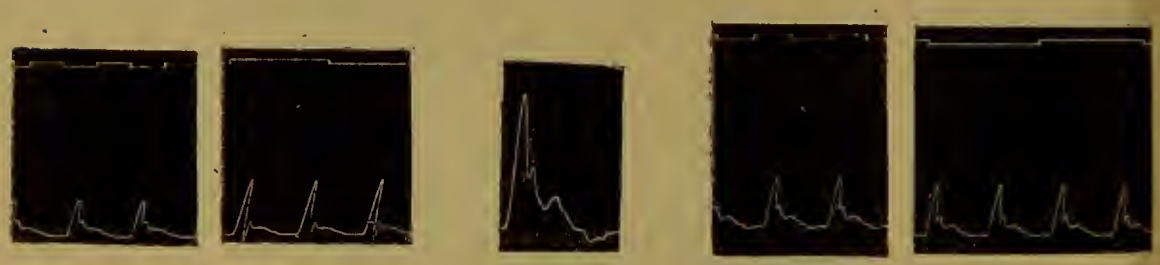


Fig. 14. T. Fig. 15.

Fig. 14. — Tracé obtenu avec le levier reposant sur un corps élastique. La force antagoniste est un poids de 50 grammes. — Amplification du levier, 15; T, Tracé type du mouvement.

Fig. 15. — Tracé obtenu avec le levier reposant sur un corps élastique (lame de ressort). La force antagoniste est un ressort du sphygmographe Marey. — Amplification du levier, 15.

ce qui n'a pas lieu quand on emploie un poids comme force antagoniste. L'inertie du poids ne fait que s'ajouter à celle du levier pour déformer le mouvement.

Si l'on répète l'expérience en remplaçant le plan rigide par un plan élastique, on voit encore que pour une même amplification

du levier (10) et pour une même fréquence du mouvement (2 par

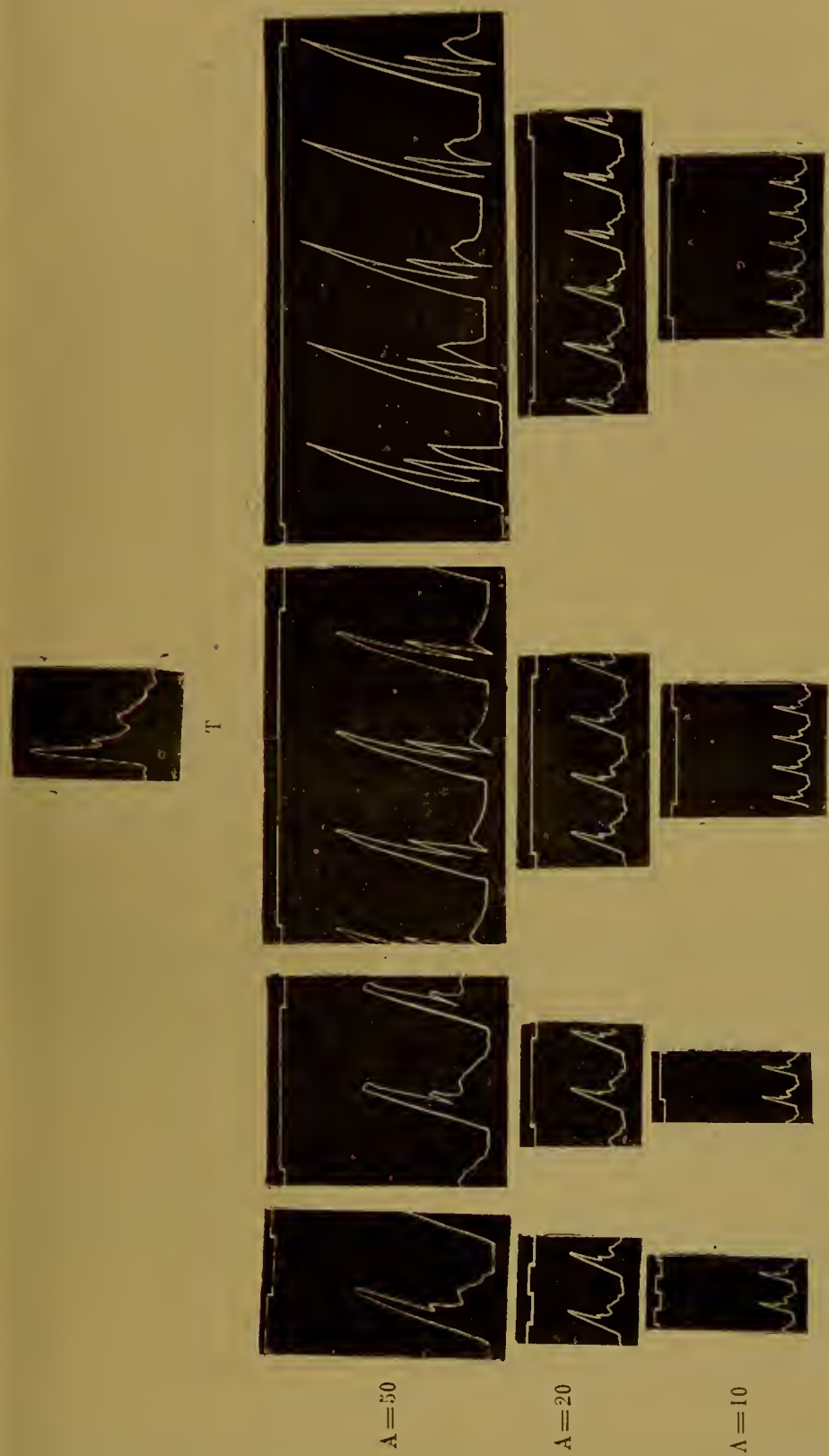


Fig. 16. — Tracés obtenus avec le levier reposant sur un corps élastique (lame de ressort). La force antagoniste est un ressort du sphygmographe Marey. — A, Amplification; T, Tracé type de la came.

seconde) le levier relié à un ressort reproduit exactement la forme

du mouvement (fig. 15), alors que le levier à poids donne des tracés comme ceux de la figure 14.

Cette expérience ne fait que démontrer combien la force élastique d'un ressort est préférable à l'action d'un poids quand il s'agit de l'inscription des mouvements rapides.

Ce principe a été appliqué pour la première fois par M. Marey dans le sphygmographe à ressort qu'il a inventé.

Prenons maintenant le levier reposant sur un corps élastique par l'intermédiaire d'un ressort, faisons varier son amplification et la fréquence du mouvement : la figure 16 montre que les effets de l'amplification sont sensiblement les mêmes que dans le cas du levier attaché au corps élastique (fig. 11). On se trouve en présence des mêmes formes de mouvements dus à l'action réciproque de la force élastique du corps et de la force d'inertie du levier.

V

LES SPHYGMOGRAPHES

8. — Les recherches que nous avons faites sur le levier et le corps qui lui communique le mouvement vont nous permettre d'aborder facilement l'étude des sphygmographes.

Depuis l'invention du sphygmographe à ressort de Marey (1856), différents auteurs ont cherché à modifier cet instrument dans le but de le perfectionner. A part quelques-unes de ces modifications qui ont touché au principe même de l'appareil, les autres n'ont porté que sur les pièces accessoires.

Les types de sphygmographes actuellement en usage sont assez nombreux; on peut cependant faire une classification parmi eux, suivant que la force qui maintient le levier en rapport avec l'artère est un poids ou un ressort.

Sphygmographes à poids.

Sphygmographe de Vierordt;	Sphygmographe de Marage;
— de Landois;	— de Philadelphien.
— de Brondel;	

Sphygmographes à ressort.

Sphygmographe de Marey;	Sphygmographe de Jaquet;
— de Ludwig;	— de Hürthle;
— de Mach;	— de Laulanié;
— de v. Frey;	— de Waller, etc.
— de Dudgeon;	

Quoique les parties principales de tout sphygmographe soient le levier et la force qui le maintient appliqué sur l'artère (poids ou ressort), les liaisons entre ces deux parties offrent aussi une très grande importance, et à ce point de vue on peut distinguer plu-

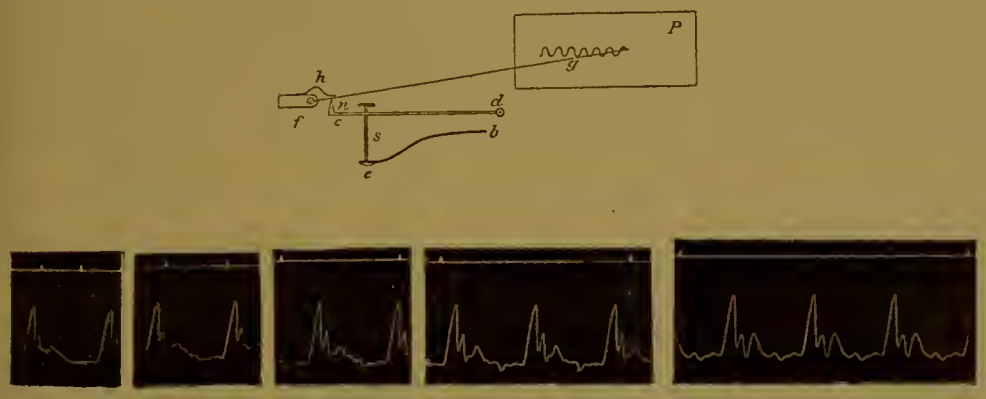


Fig. 17. — Sphygmographe à couteau de Marey.

sieurs types de sphygmographes. Ainsi, dans le premier sphygmographe de Marey[1] (fig. 17), le levier reposait sur un couteau fixé à l'extrémité libre de la pièce *n*, qui est articulée en *d* et qui reçoit le mouvement du ressort par l'intermédiaire de la vis (S). Un petit ressort (*h*) assure le contact du levier avec le couteau (*c*) et agit comme force antagoniste de la force d'inertie du levier.

Plus tard, Marey[2] a modifié le système de liaison en mettant sur l'axe du levier un petit galet (fig. 15) avec lequel s'engrène la vis qui se trouve articulée avec bouton explorateur. Le galet a été adopté par d'autres auteurs (Ludwig, Landois, Jacquet) dans leurs sphygmographes.

1. Marey : Journal *l'Institut*, 1860. — Recherches sur le pouls au moyen d'un nouvel appareil enregistreur, le sphygmographe. *Gaz. méd.*, 1860.
2. Marey : *La Circulation du sang*, 1881.

Mach[1] a remplacé le galet par une bielle (fig. 20). Le levier a son articulation sur la pièce (*a*), qui peut monter ou descendre à l'aide de la vis (F), ce qui permet de maintenir le levier dans la position horizontale. Ce dispositif a été adopté par v. Frey et par Hürthle dans leurs sphygmographes.

9. — Sphygmographes a ressort. Étude statique. — Nous avons pu étudier les sphygmographes de Marey (à couteau et à galet), de Ludwig, de von Frey, de Jaquet, de Dudgeon et de Hürthle. Les figures 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23 montrent les schémas de ces appareils.

Dans une première série d'expériences, nous avons cherché de

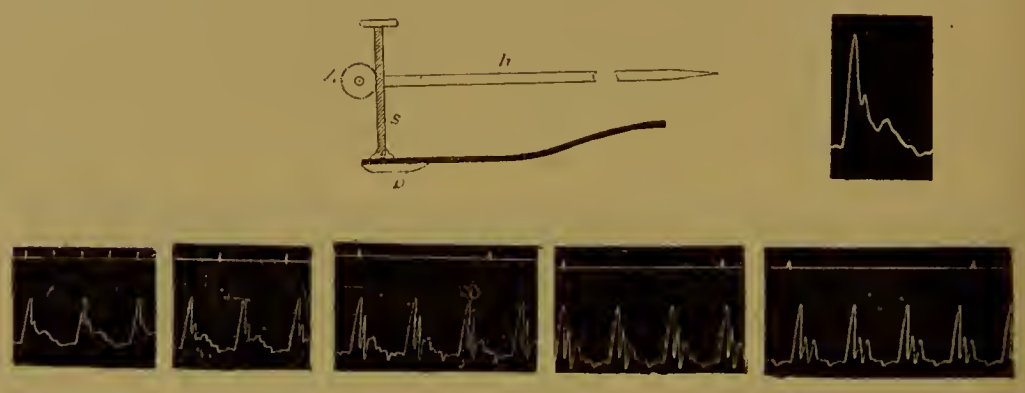


Fig. 18. — Sphygmographe à galet de Marey.

quelle manière se comporte la force élastique des ressorts sous l'influence de charges régulièrement croissantes. Cette force élastique des ressorts est très variable dans les différents sphygmographes et, de plus, elle peut varier dans un même appareil suivant la tension plus ou moins forte qu'on leur donne. Tous les sphygmographes possèdent en effet des moyens qui permettent de faire varier la tension de leurs ressorts. Cependant l'importance de cet élément est secondaire, vu que l'amplitude seule du mouvement peut être modifiée par les différences de tension. Ce qui est essentiel, c'est la marche de la flexibilité des ressorts sous l'influence des forces qui agissent sur eux. Nos expériences nous ont confirmé que cette flexibilité est proportionnelle, toutes choses

1. Mach : Zur Theorie der Pulswellenzeichner. *Sitzungsb. d. Kais. Akad. d. Wissenschaft.*, Wien, XLVI, 1862.

égales d'ailleurs, à la charge, cela bien entendu, entre les limites de leur fonctionnement.

Les leviers enregistreurs varient aussi comme forme et comme amplification. Tantôt ils affectent la forme d'un cylindre (brin de paille), tantôt celle d'une lame aplatie en bois ou en métal. Les uns écrivent tangentiellement à la surface du cylindre ou obliquement à la surface d'une plaque mobile (sphygmographes de Marey, de von Frey et de Hürthle); d'autres écrivent perpendiculairement à la surface mobile pour éviter l'arc de cercle (la plume de Ludwig); d'autres enfin écrivent sur une bande de papier se déplaçant hori-

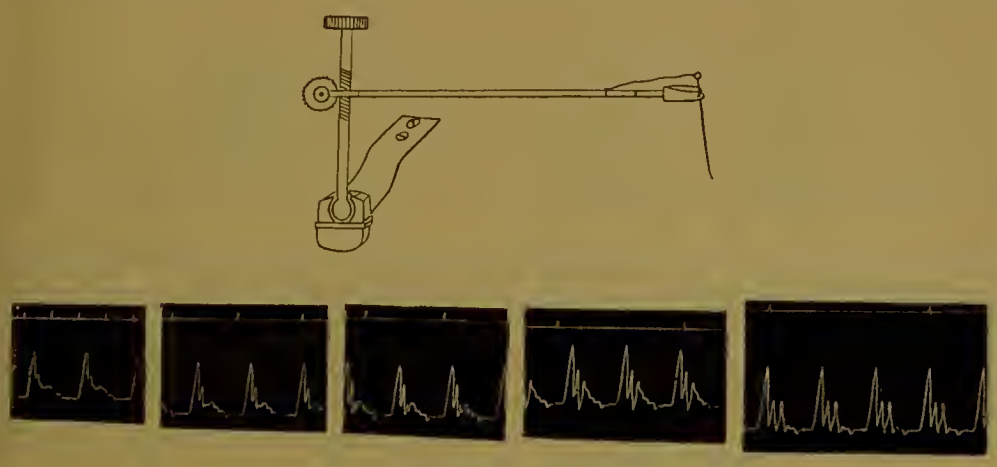


Fig. 19. — Sphymographe de Ludwig.

zontalement, et la plume repose sur le papier par son propre poids (sphygmographes de Ludwig, de Dudgeon et de Jaquet).

L'amplification du levier dans les sphygmographes que nous avons étudiés est la suivante :

	AMPLIFICATION du levier
Sphygmographe de Marey à couteau	37
— — à galet	60
— de Ludwig	50
— de v. Frey	57
— de Dudgeon	48
— de Jaquet	135
— de Hürthle	50

10. — Étude dynamique des sphygmographes a ressort. — Les indications du sphygmographe ont fait l'objet de nombreuses recherches et discussions.

Peu de temps après l'invention du sphygmographe à ressort, Buisson chercha à déterminer la part qui revient à l'inertie du levier dans les tracés donnés par cet appareil. La méthode très ingénieuse de Buisson consiste à mettre des cales sous le levier inscripteur jusqu'à ce qu'il ne trace que le sommet des courbes du pouls. On voit alors que le levier s'arrête toujours à la même hauteur, quelle que soit la grandeur de la course qu'il fait.

Mach[1] a fait une étude théorique et expérimentale sur le sphygmographe à ressort de Marey. Par cette étude, l'auteur a

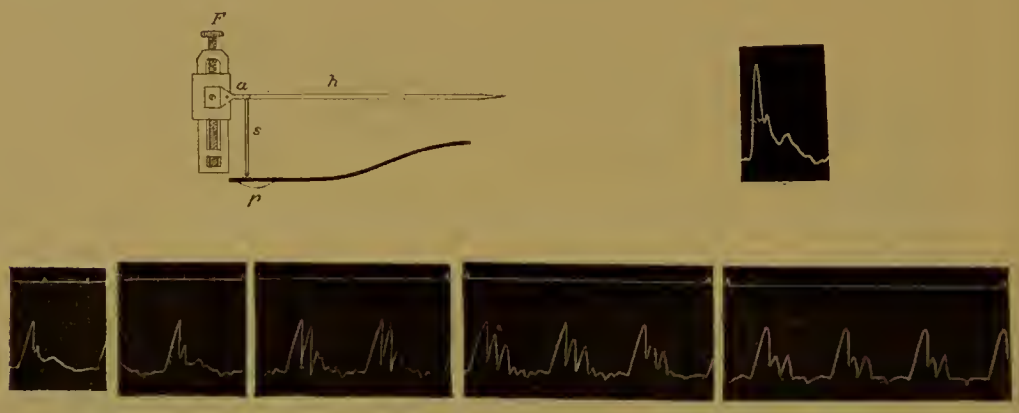


Fig. 20. — Sphygmographe à bielle de Mach modifié par v. Frey. — T, Tracé type de la came.

démontré la supériorité du ressort sur le poids dans les appareils destinés à inscrire des variations brusques de pression comme c'est le cas du sphygmographe. De plus, Mach a soumis le sphygmographe de Marey à des essais de contrôle qui consistaient à lui faire inscrire la forme d'ondes liquides engendrées dans un tube de caoutchouc au moyen d'une pompe.

Ces expériences ont montré que le sphygmographe de Marey est exempt de vibrations propres.

Koschlakoff[2] s'est servi d'une méthode analogue à celle employée par Mach. Dans une première série d'expériences, l'auteur s'est servi d'un dispositif expérimental très simple : un vase

1. Mach : Zur Theorie der Pulswellenzeichner. *Sitzungsb. d. Kais. Akad.*, Wien. 1862, 157-174.

2. Koschlakoff : Untersuchungen über den Puls mit Hulfe der Marey'schen Sphygmographe. *Arch. f. pathol. Anat. u. Physiol.*, Bd. XXX, 1-28.

rempli d'eau et placé à une certaine hauteur se continuait par un tube de verre muni d'un robinet à son extrémité inférieure ; de ce robinet partait un tube de caoutchouc placé horizontalement et sur lequel on adaptait le sphygmographe. Les ondes liquides étaient produites par l'ouverture et la fermeture du robinet.

Plus tard Koschlakoff a employé une seringue et un tube muni de soupapes, imitant le cœur avec ses valvules. Les résultats obtenus par l'un ou l'autre de ces moyens d'expérience ont permis à Koschlakoff de conclure que le sphygmographe de Marey peut enregistrer des variations brusques de pression sans altérer leur forme.

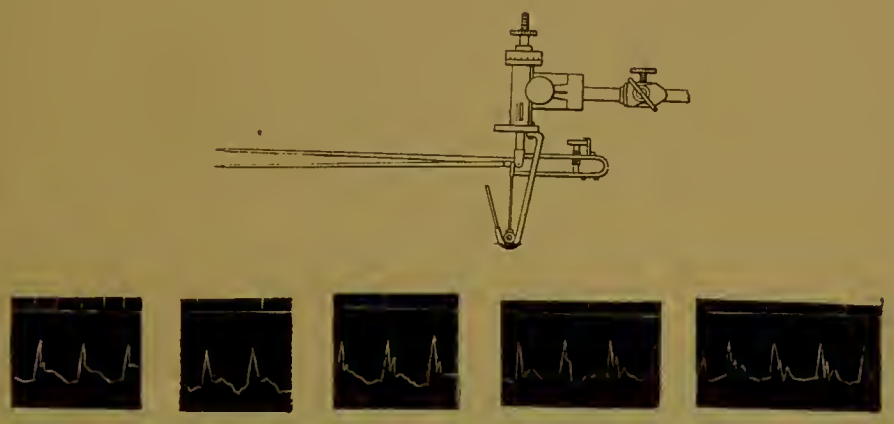


Fig. 21. — Sphygmographe de Hürthle pour les artères découvertes.

Rive[1] a étudié la force élastique et la période propre du ressort du sphygmographe. En soumettant ce ressort à des pressions régulièrement croissantes, Rive a trouvé que la flexion est proportionnelle à la charge quelle que soit la longueur du ressort.

Bätke[2] a fait une étude comparative entre le sphygmographe de Marey et celui de Jaquet au point de vue de l'exactitude de leurs indications. Dans ce but l'auteur s'est servi d'un dispositif expérimental qui lui permettait de communiquer à ces appareils un mouvement de forme connue (donné par une came) et dont la rapidité pouvait être plus ou moins grande. *Le bouton du sphygmographe reposait sur un corps rigide.*

1. Rive (W.) : De Sphygmograaf en de Sphygmographische Curve. *Disertat.*, Utrecht, 1866.

2. Batke : Experimentelle Prüfung des Jaquet'schen Sphygmochronographen. *Disertation*, Rostock, 1901.

De cette étude l'auteur conclut que le sphygmographe de Jaquet présente des vibrations propres, ce qui altère la forme du mouvement quand sa fréquence dépasse certaines limites. Ce défaut n'existe pas dans le sphygmographe de Marey.

Jaquet[1] répétant les expériences de Bätke au moyen de la même méthode a montré que la critique de cet auteur s'appliquait au sphygmographe de Dudgeon et non pas au sien qui serait exempt de vibrations propres même pour des fréquences assez grandes (150 mouvements par minute).

11. — Nous reportant aux expériences que nous avons faites

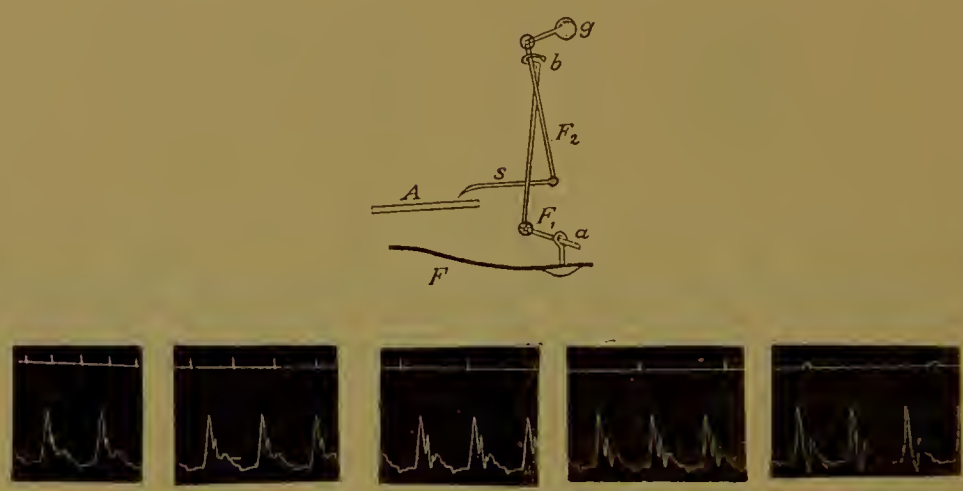


Fig. 22. — Sphygmographe de Dudgeon.

sur le levier et le corps qui lui communique le mouvement il est aisé de voir que l'étude dynamique du sphygmographe ne pourrait être faite si les conditions suivantes n'étaient pas réalisées :

1° Posséder un mouvement de forme connue;

2° Avoir la possibilité de changer la rapidité de ce mouvement entre certaines limites;

3° Communiquer le mouvement au bouton du sphygmographe au moyen d'un corps élastique.

Le dispositif expérimental que nous avons employé remplit toutes ces conditions (fig. 5 et 6) :

1. Jaquet : Zur Technik der graphischen Pulsregistrirung. *Münch. med. Wochenschrift*, 1902.

La came *c* communique le mouvement au piston de la pompe (P) par l'intermédiaire d'un levier rigide.

La pompe est en relation avec un tube de caoutchouc à paroi assez épaisse ayant 7 millimètres de diamètre intérieur et 50 centimètres de longueur. La pompe et le tube sont remplis d'eau et le bout libre du tube est fermé au moyen d'une pince. Ce tube est maintenu sur un plan rigide et le bouton du sphygmographe est appliqué assez près du bout libre. Cet appareil aura à inscrire la forme d'une onde liquide engendrée par un coup de piston. La

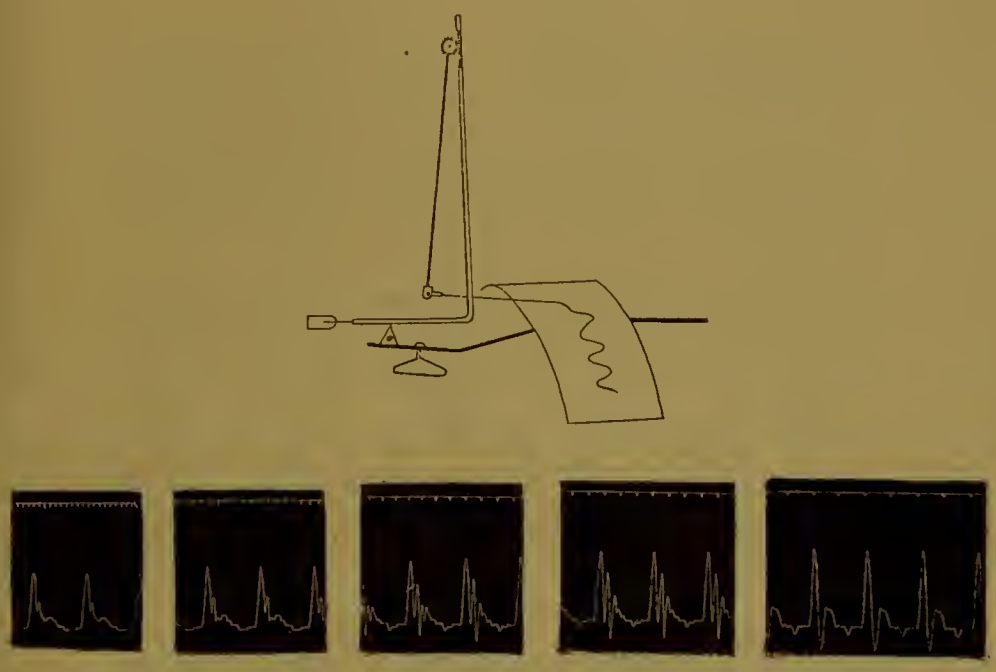


Fig. 23. — Sphygmographe de Jaquet.

forme de cette onde sera celle du profil de la came, et sa force sera proportionnelle à la quantité de liquide chassé de la pompe dans l'unité de temps. Il s'ensuit que l'amplitude des tracés donnés par le sphygmographe sera d'autant plus grande que le mouvement sera plus rapide. Cela ne nous permettra pas de juger de la valeur de l'appareil puisque les tracés n'ont plus la même forme quand la rapidité du mouvement change. Il faut donc avoir la possibilité de faire varier la fréquence du mouvement sans changer ni sa forme ni sa force. Cette condition peut être réalisée en mettant sur le trajet du tube (entre le sphygmographe et la pompe) une série de pinces d'autant plus serrées qu'elles sont plus près du sphygmo-

graphe. On arrive ainsi par des tâtonnements à éteindre l'excès de force vive que l'onde acquiert quand la fréquence du mouvement augmente.

Une fois l'installation expérimentale réglée comme nous venons de le dire, on place à l'aide de montures appropriées tous les sphygmographes sur cette artère artificielle et on les fait inscrire sur le même cylindre dont le mouvement est donné par le même moteur que celui de la came. Les sphygmographes de Dudgeon et de Jaquet ne pouvant pas être appliquées sur le cylindre enregistreur inscrivent sur une bande de papier placée comme à l'ordinaire mais qui est entraînée par le même cylindre qui a servi pour les autres sphygmographes.

Si l'on compare les figures : 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23, on voit qu'à partir d'une certaine fréquence (60-80 mouvements par minute) tous ces sphygmographes altèrent la forme du mouvement qu'ils ont reçu.

Comme nous ne pouvons pas incriminer les ressorts pour les raisons exposées plus haut, il ne reste que les leviers qui, par leur amplification exagérée, seraient la cause de ces déformations. Nous avons donné alors à tous ces sphygmographes une même amplification (20), et, sans rien changer au système, nous avons inscrit le même mouvement et dans les mêmes conditions de fréquence.

La figure 24 montre que la forme du mouvement est assez exactement reproduite jusqu'à une fréquence de 150-180 mouvements par minute. Il faut faire une réserve pour le sphygmographe de Dudgeon et cela tient à ce que dans ce sphygmographe (fig. 22) le levier (F^2) n'est pas relié à la tige (*b*) qui lui communique le mouvement. Il est pris dans un anneau que cette tige présente à son extrémité supérieure et maintenu en contact avec cet anneau par le contrepoids G. Il s'ensuit que ce contact se perd quand le mouvement est rapide et alors le levier ne peut plus le suivre dans toutes ses phases.

On peut voir aussi une légère altération dans le tracé donné par le sphygmographe de Ludwig (fig. 19), et cela ne peut tenir qu'à la forme de la plume, qui n'est pas exempte de vibrations propres.

De cette expérience, nous pouvons conclure que le défaut principal

des sphygmographes à ressort réside dans l'amplification excessive de leurs leviers.

A cela s'ajoutent les liaisons entre le levier et le bouton explorateur. Quand c'est un galet, il faut que son filet soit exactement

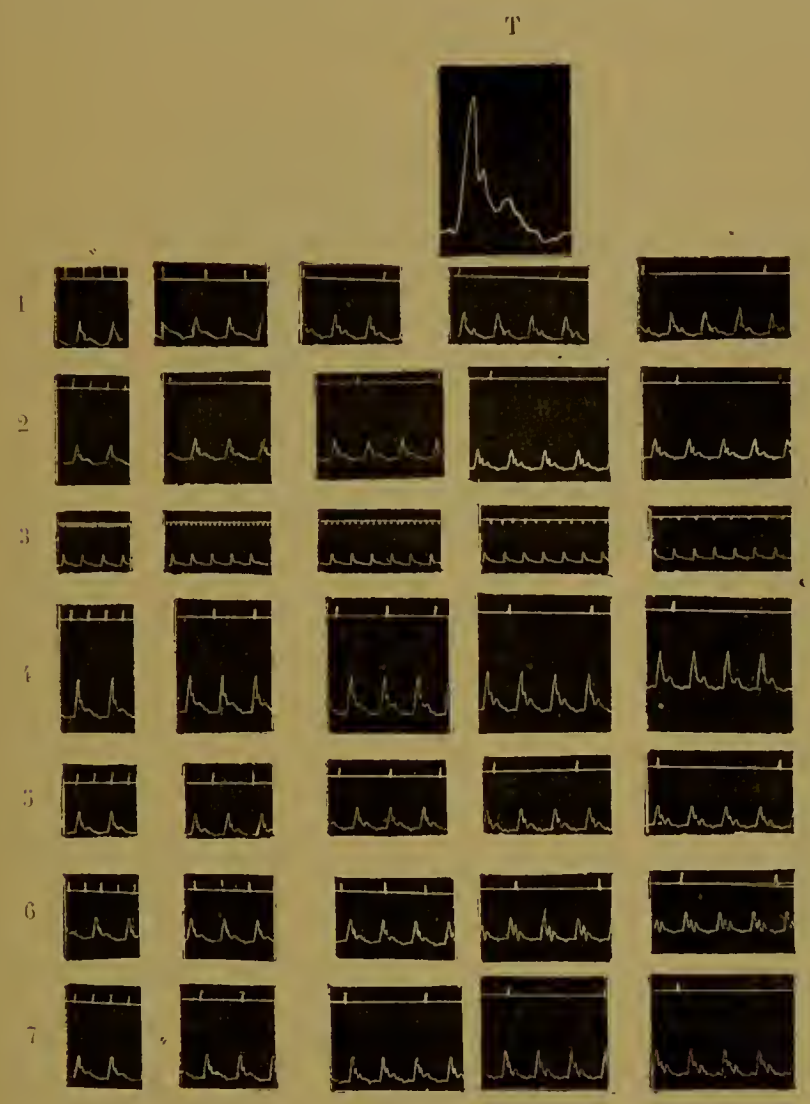


Fig. 24. — Tracés obtenus avec différents sphygmographes à ressort, ayant tous une même amplification. — Amplification, 20; T, Tracé type de la came. — 1, Sphygmographe à galet de Marey; 2, S. à galet de Ludwig; 3, S. à galet de Jaquet; 4, S. à couteau de Marey; 5, S. à bielle de v. Frey; 6, S. de Dudgeon; 7, S. de Hürthle.

le même que celui de la vis; quand c'est une bielle, il faut éviter le jeu et le frottement dans les articulations. Enfin, dans le sphygmographe de Dudgeon, il faut rendre solidaires le levier et la tige qui lui communique le mouvement.

Pour montrer que l'amplification de 20 suffit pour inscrire le

pouls sur l'artère radiale même, nous avons placé cinq de ces sphygmographes (à amplification réduite) sur le poignet d'une même personne, et nous avons obtenu des tracés comparables donnés par la figure 25.

L'application du sphygmographe sur le poignet présente aussi une importance considérable. Nous nous sommes servis du support

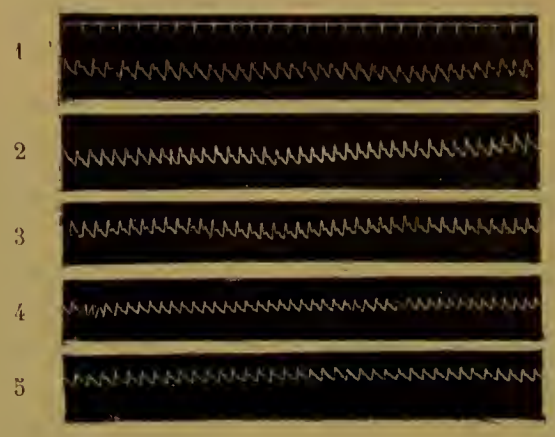


Fig. 25. — Tracés du pouls radial obtenu avec différents sphygmographes à amplification réduite (20), étant tous placés sur le poignet d'une même personne. — 1, Sphygmographe à galet de Marey; 2, S. à galet de Ludwig; 3, S. à bielle de v. Frey; 4, S. de Dudgeon; 5, S. de Jaquet.

de Ludwig et nous avons donné aux ressorts de tous ces sphygmographes une tension moyenne.

Tout en faisant la part de ces nombreux facteurs, nous voyons que les tracés de la figure 25 sont comparables entre eux et nous concluons que les sphygmographes mentionnés plus haut d'amplification ne dépassant pas 20 donneront des indications comparables et précises si l'on prend en outre les précautions que nous venons d'indiquer.

VI

TRANSMISSIONS A DISTANCE ET INSCRIPTION DES MOUVEMENTS. TRANSMISSION PAR L'AIR

12. — Historique. — En outre des services que la méthode graphique a rendus en révélant la forme réelle des phénomènes physiologiques, elle a permis de saisir les rapports de succession et de durée de plusieurs phénomènes inscrits simultanément. Elle a fait connaître ainsi les influences réciproques des divers actes de l'organisme les uns sur les autres. Un type de ce genre d'inscription simultanée, c'est la cardiographie, qui a montré la force et la durée des mouvements des diverses cavités du cœur.

M. Marey avait déjà senti le besoin d'inscriptions simultanées, lorsqu'il voulut déterminer la marche des variations de pression dans un tube élastique plein de liquide : problème qui devait éclaircir le phénomène du retard du pouls suivant le trajet des artères.

Mais dans ce cas les conditions étaient assez simples : on superposait quatre leviers dans un même plan en plaçant leurs pointes écrivantes sur une même génératrice du cylindre vertical qui devait recevoir le tracé. On obligeait alors le tube flexible à se courber en spirale pour passer successivement sous chacun de ces leviers, de façon que chacun d'eux inscrivît les changements de pression qui se produisaient en des points de plus en plus éloignés de l'orifice d'entrée du liquide.

En dehors de ce cas, assez exceptionnel, où les mouvements étudiés venaient se soumettre d'eux-mêmes au levier inscripteur, il fallut trouver un moyen d'aller chercher chacun de ces mouvements dans le lieu où il se produisait et de les amener sous les leviers chargés de les inscrire.

La transmission d'un mouvement à distance a été tentée pour la première fois par le Dr Upham, de Boston. Il s'agissait de faire percevoir à un public nombreux la succession des battements des oreillettes et des ventricules du cœur sur un homme atteint de fissures congénitales du sternum.

Upham appliquait sur la peau, au-devant des oreillettes et des ventricules, de petits entonnoirs en verre remplis de mercure, dont les pavillons étaient fermés par des membranes en caoutchouc. et remplies de mercure. A chaque pulsation de l'oreillette ou du ventricule, la colonne de mercure s'élevait dans le tube de l'entonnoir, comme elle l'eût fait dans un sphygmomètre d'Hérisson.

Les tubes des entonnoirs étaient prolongés par des tuyaux en caoutchouc pleins d'air, et le déplacement d'air produit dans ces tuyaux par le déplacement du mercure actionnait deux sonneries de timbres différents; la succession de ces deux sons révélait à l'oreille celle des mouvements des oreillettes et des ventricules du cœur.

On pourrait prouver aujourd'hui qu'un tel mode de transmission est assez infidèle, car l'instant où se fait entendre chaque sonnerie retarde toujours plus ou moins sur le début de la pulsation qu'elle devait signaler.

M. Marey eut des insuccès analogues lorsque, en 1858, il chercha à inscrire la succession des battements de l'oreillette droite, de ceux du ventricule droit et du choc du cœur sur le cheval.

Le cœur de l'animal étant mis à nu, et la respiration artificielle pratiquée, on prit des tubes de plomb terminés à leurs deux extrémités par des ampoules de caoutchouc. Le tout étant rempli d'eau, on introduisit dans l'oreillette l'ampoule initiale d'un de ces tubes, l'autre fut introduite dans le ventricule, tandis que les ampoules terminales étaient placées sous deux leviers inscripteurs. Un pareil système de tubes à ampoules devait signaler la pulsation du cœur. Mais l'inertie de la longue colonne liquide qui remplissait les tubes de plomb ne permettait pas aux effets de l'oreillette de se transmettre jusqu'aux appareils inscripteurs. Un moyen de transmission plus sensible devait permettre la réalisation de ces espérances.

En 1859, Buisson, prenant deux entonnoirs de verre dont les pavillons étaient fermés par des membranes en caoutchouc, réunit par un tube les becs de ces entonnoirs, et montra que les mouvements même les plus légers se transmettaient fort bien d'un entonnoir à l'autre.

En appliquant l'un des deux entonnoirs sur la carotide d'un homme, tandis que l'on faisait agir la membrane de l'entonnoir

conjuguée sous le levier d'un sphygmographe, on obtenait à distance le tracé très fidèle du pouls carotidien, en tous points semblable à celui que donnait un sphygmographe directement appliqué sur la carotide.

Buisson obtint même, en appliquant l'un des entonnoirs sur la région précordiale, un tracé dont la signification, alors inexplicable, devait être éclairée bientôt par les expériences de cardiographie.

En 1861, M. Marey reprit, avec le concours de M. Chauveau, les expériences en vue de fixer la physiologie sur la succession réelle des mouvements du cœur. Ces auteurs se servirent de la transmission par l'air imaginée par Buisson; ils remplacèrent les entonnoirs à membrane par des appareils spéciaux : d'une part les *ampoules exploratrices*, destinées à pénétrer dans les cavités du cœur, où elles subissaient un surcroît de pression au moment des systoles de ces cavités ; d'autre part, les *ampoules réceptrices* qui, par leur gonflement, devaient soulever les leviers des sphygmographes enregistreurs. Ces dernières ont reçu une disposition spéciale à laquelle les auteurs ont donné le nom de *tambour à levier*.

Les expériences de cardiographie ont inauguré une méthode qui a rendu les plus grands services à la physiologie; elle se prête en effet à l'inscription des divers phénomènes mécaniques dont l'organisme vivant est le siège. Dans tous les cas, le mouvement qu'on veut connaître est recueilli par une ampoule à air : *ampoule exploratrice* de forme variable, suivant le phénomène auquel elle s'applique; tandis que, à l'autre extrémité du tube de transmission, ce mouvement est inscrit par une ampoule réceptrice : le *tambour à* levier. Celui-ci doit être immuable dans sa forme, toujours fidèle dans ses indications, même pour les mouvements les plus rapides.

13. — Dans toutes les applications de cette méthode, il est important de savoir à quelle force agissant sur l'ampoule exploratrice correspond chaque ordonnée de la courbe tracée. Ce rapport ne saurait être calculé facilement. Il y a trop d'influences multiples qui font varier à chaque instant la pression de l'air dans l'intérieur du tambour, et consécutivement les soulèvements de la membrane et du levier inscripteur. Toutefois, un contrôle expérimental est toujours possible. Il consiste à faire agir sur l'appareil explorateur une

série de pressions connues et à déterminer la hauteur à laquelle s'élève le levier pour chacune de ces pressions. C'est ce que MM. Marey et Chauveau ont fait pour les appareils cardiographiques en établissant une échelle qui permettait, dans la lecture des courbes, d'attribuer à chaque ordonnée la valeur de la pression qu'elle exprime, valeur rapportée au manomètre à mercure. Telle a été la méthode de contrôle statique des appareils à transmission par l'air.

Le contrôle dynamique de ces appareils a fait l'objet de nombreuses recherches.

C'est à Donders [1] que l'on doit les premiers essais pour contrôler la fidélité des tracés du tambour à levier appliqué à l'inscription de variations rapides de pression. Dans une première série d'expériences, Donders enregistre simultanément sur le même cylindre la pression exercée sur le stéthoscope (qui servait d'appareil explorateur) et la courbe tracée par le levier du tambour qui est en relation avec le stéthoscope. Quand le choc appliqué au stéthoscope est assez brusque, on voit que le levier du tambour décrit plusieurs oscillations, alors que le style, qui est en relation avec le stéthoscope, n'en donne qu'une.

Par cette méthode, il s'agissait, comme on le voit, d'une onde simple et non pas d'un mouvement ayant une forme plus ou moins compliquée. Donders a eu alors recours à une autre méthode. Il prend deux tambours à levier reliés entre eux à l'aide d'un tube de caoutchouc. Un de ces tambours sert de manipulateur et l'autre d'enregistreur. Un excentrique dont le profil représente un mouvement connu (cardiogramme) agit sur le levier manipulateur; ce mouvement est transmis au tambour enregistreur. Les leviers des deux tambours inscrivent sur le même cylindre. On voit alors que si la fréquence du mouvement n'est pas grande il y a identité parfaite entre les deux graphiques. Cette ressemblance cesse d'avoir lieu si la fréquence atteint une certaine valeur.

Langendorff [2] a employé une méthode analogue à celle de Donders, avec cette différence qu'on agit sur le levier du tambour

1. Donders : Examen du cardiographe, 1863.
2. Langendorff : *Physiologische Graphik*, 1891.

manipulateur au moyen d'un fil et non pas par une came. En tirant à la main ce fil, le levier auquel il est attaché décrira une certaine courbe qui doit être reproduite en sens inverse par le tambour enregistreur.

Hürthle[1] a fait une étude très systématique sur les divers éléments qui composent le système à transmission par l'air. Il s'est servi de la méthode de Donders en agissant à la main sur le levier du tambour manipulateur.

Les recherches de Hürthle ont porté sur le tambour à levier et le piston recorder, comme appareils inscripteurs, sur les tubes de transmission et sur le tambour explorateur.

Nous ne pouvons que résumer les principales conclusions qui se dégagent de cette étude.

a) Le poids du levier et ses pièces accessoires doit être réduit au minimum;

b) L'amplification trop grande du levier et le frottement dans ses articulations sont nuisibles pour la fidélité des indications du tambour enregistreur;

c) Les tambours de diamètre différent reproduisent généralement de la même manière un mouvement donné; les petits tambours répondent plus vite sans que pour cela ils aient des vibrations propres;

d) La tension de la membrane n'a pas une grande signification; un tambour, surtout s'il est petit, peut reproduire la forme du mouvement qu'on lui communique, même quand sa membrane est faiblement tendue;

e) La membrane mince répond mieux que la membrane épaisse;

f) Le volume de la cuvette, à moins qu'il ne dépasse pas certaines limites, est sans influence sur le fonctionnement du tambour à levier;

g) Le piston recorder, construit dans de bonnes conditions (réduction au minimum de la masse et du frottement), peut donner de bons résultats; malgré cela, le tambour à levier est encore plus sensible que le piston recorder pour les faibles mouvements;

1. Hürthle : Beiträge zur Hämodynamik. Kritik der Lufttransmissionsverfahrens. *Arch. f. d. Gesammte Physiolog.*, 1892, LIII, 281-331.

h) La grandeur du tambour explorateur et de son disque doit être en rapport avec l'intensité du mouvement. Pour le choc du cœur, un explorateur ayant 60 millimètres de diamètre convient très bien.

i) Le tube de transmission doit avoir de 6 à 10 millimètres de diamètre intérieur et la moindre longueur possible.

14. — Parmi les appareils explorateurs, le sphygmoscope a été soumis à des essais de contrôle. Ainsi Ansiaux[1] a étudié comparativement le sphygmoscope de Chauveau et Marey et les manomètres élastiques de Gad, Hürthle et Fick au point de vue de leur sensibilité. De ces recherches, il résulte que le sphygmoscope construit d'après les indications de M. Frédéricq (chambre à air très réduite et membrane élastique tendue) donne des indications aussi fidèles que les autres manomètres élastiques.

Delarbre et Pachon[2] se sont servi de la méthode de Donders pour contrôler les sphygmoscopes qu'ils ont employés dans leur étude sur la mécanique du pouls artériel.

Les conclusions qui se dégagent de ce travail sont les suivantes :

a) La chambre à liquide doit avoir une certaine grandeur, contrairement à ce que Ansiaux a soutenu ;

b) La surface vibrante doit se trouver dans un certain rapport avec le volume du sphygmoscope. Le meilleur sphygmoscope serait celui qui, pour un faible volume, offrirait une très grande surface :

c) Le sphygmoscope à forme conique convient mieux pour les mouvements de faible intensité, alors que le sphygmoscope à calotte sphérique convient mieux pour les chocs de plus grande force vive.

VII

15. — Étude des appareils a transmission par l'air. — Dans tout système à transmission par l'air, il faut distinguer trois

1. Ansiaux : Recherches critiques et expérimentales sur le sphygmoscope de Chauveau et Marey et les manomètres élastiques. *Arch. d. Biologie*, 1892, XII, 611-637.

2. Delarbre : Etude expérimentale sur le Sphygmoscope et la mécanique du pouls artériel. — Thèse, Bordeaux 1902.

parties : l'appareil explorateur, le tube de transmission et l'appareil inscripteur. Vu la complexité d'un pareil système et la solidarité qui existe entre ses nombreux éléments, il serait impossible de connaître la part de chacun de ces éléments si on s'adressait au système tout entier. En effet, nous avons vu plus haut comment Donders a pu montrer qu'à partir d'une certaine rapidité de mouvement les indications du tambour inscripteur n'étaient plus fidèles. Mais cette méthode était insuffisante pour trouver le point du système qui altérait la forme du mouvement.

Pour arriver à ce résultat, il est de toute nécessité d'étudier d'abord séparément chaque partie du système à transmission par l'air, et ensuite de les associer tout en se gardant de faire varier plus d'une de ces parties à la fois.

C'est ce procédé que nous avons suivi dans nos recherches, et nous avons commencé par l'étude des appareils inscripteurs. Nous avons étudié ainsi *le tambour à levier*, *le piston recorder et le soufflet enregistreur de Brodie.*

Le tambour à levier. Étude statique.

16. — Parmi les éléments dont cet appareil se compose, il y en a un qui a attiré d'une manière toute spéciale notre attention. C'est la membrane élastique. Généralement, cette membrane est en caoutchouc et son fonctionnement obéit à certains principes que nous avons étudiés tout d'abord.

L'élasticité du caoutchouc tout en étant assez parfaite est loin d'être constante. Cela est dû, d'une part, à sa composition très complexe qui varie suivant les plantes dont il dérive, et d'autre part aux préparations qu'il subit (vulcanisation, etc.). A cela s'ajoutent l'influence de l'humidité, celle de la chaleur, etc., qui peuvent modifier son état élastique. Dès lors on comprend l'impossibilité d'introduire cette substance dans les appareils de mesure, qui doivent rester toujours semblables à eux-mêmes. Si, au contraire, ces appareils sont appelés à donner des valeurs relatives, alors cette substance devient précieuse par sa propriété élastique.

Dans une première série d'expériences nous avons cherché la relation qui existe entre la force élastique des membranes en caoutchouc et les forces qui agissent sur elles.

Imbert[1] a vu que l'allongement du caoutchouc n'est pas en tout point proportionnel à la charge. Si l'on traduit sous forme de courbe la relation entre les poids tenseurs et les allongements en mettant ceux-ci en ordonnées et les poids tenseurs en abscisses, on voit que la courbe présente une inflexion dont la concavité est tournée d'abord vers les y positifs, puis change de sens et est tournée vers les y négatifs. Nos recherches concordent entièrement avec ces données de M. Imbert, comme la courbe suivante le prouve (fig. 26).

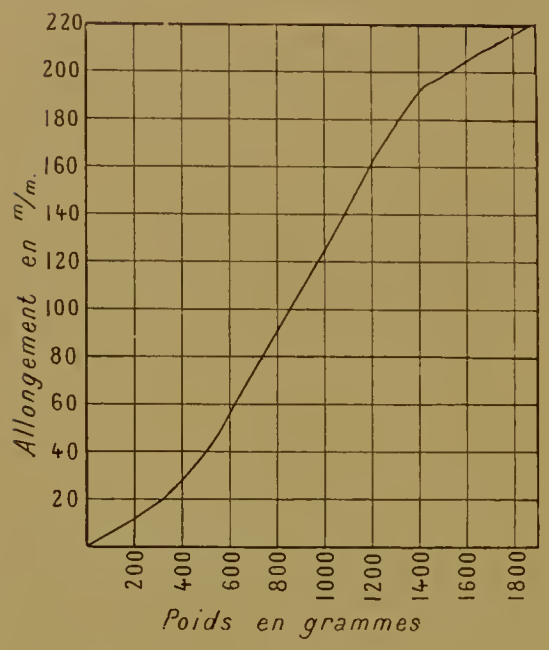


Fig. 26.

L'examen de cette courbe montre qu'à partir d'une certaine tension, les allongements sont proportionnels aux charges. Cette proportionalité cesse d'avoir lieu au fur et à mesure qu'on s'approche de la limite d'élasticité du caoutchouc. Ce fait est d'une grande importance, et il nous permet d'entrevoir une pareille proportionalité entre la flèche de la membrane du tambour et la force de pression qui agit sur elle.

17. — Relation entre la flèche et la pression dans le tambour a levier. Influence de divers états de la membrane (tension, surface et épaisseur) sur la hauteur de la flèche. — Quand la pression augmente dans un tambour à levier, la membrane se gonfle et comme la force qui agit sur elle est toujours normale à la surface et égale en tous points, cette membrane prend la forme d'un segment sphérique, cela, bien entendu, entre certaines limites de pression. A l'aide de la photographie on peut s'assurer que la nouvelle forme que la membrane prend sous l'influence de la force de pression est un segment de sphère dont le rayon partant de l'infini diminue au fur et à

1. Imbert : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'élasticité du caoutchouc.* Lyon, 1880.

mesure que la pression augmente (fig. 27). Au delà d'une certaine pression, la courbure devient elliptique.

Fig. 27.

Nous allons voir maintenant comment la flèche de ce segment sphérique va se comporter sous l'influence d'une pression régulièrement croissante. Nous avons employé pour cela le dispositif expérimental représenté par la figure 28. C'est un système à parois rigides et composé

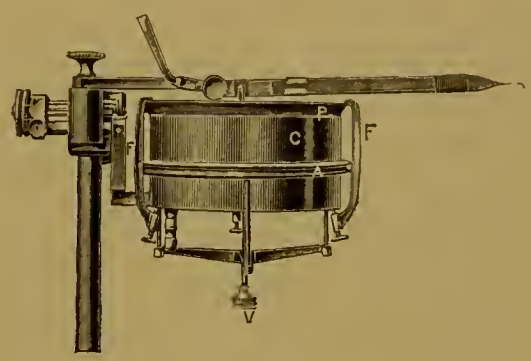


Fig. 29. — Appareil pour étudier l'influence de la tension des membranes en caoutchouc sur la flèche du tambour à levier. — C, cuvette cylindrique. — A, Anneau pouvant monter et descendre le long de la cuvette au moyen de la vis V. — P, Bague de protection maintenue à l'aide des agrafes (F).

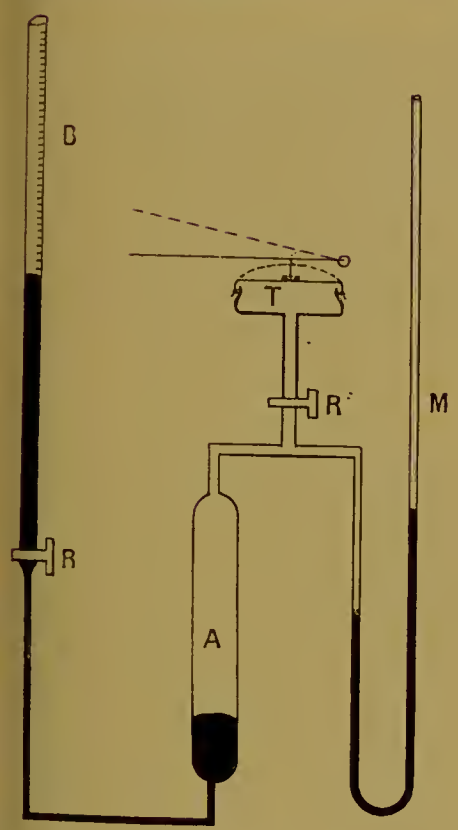


Fig. 28. — Dispositif expérimental pour l'étude de la flèche du tambour à levier en fonction de la pression intérieure. — A, Réservoir à air. — B, Burette. — M. Manomètre à mercure. — T, Tambour à levier.

d'un réservoir (A) mis en relation avec la burette (B) qui contient du mercure, avec le manomètre (M) et avec le tambour (T).

La forme de ce tambour est celle donnée par la figure 29. Le long de la cuvette cylindrique (C) ayant 25 millimètres de hauteur, glisse l'anneau (A) qui est entraîné par la vis (V). Pour fixer la membrane, on remonte cet anneau près du bord libre de la cuvette et l'on applique

une première ligature dans la gorge que cet anneau porte à sa face extérieure.

On comprend que si l'on fait descendre l'anneau (A) la membrane sera tendue uniformément. Pour connaître la valeur de cette tension, on dessine préalablement sur la membrane un carré de côté connu et le rapport entre la surface finale de ce carré et la surface initiale nous donne le degré de tension.

Pour rendre le tambour étanche, on applique une autre ligature dans la gorge qui se trouve près du bord supérieur de la cuvette. La bague (P) maintenue à l'aide des agrafes (F) sert, d'une part,

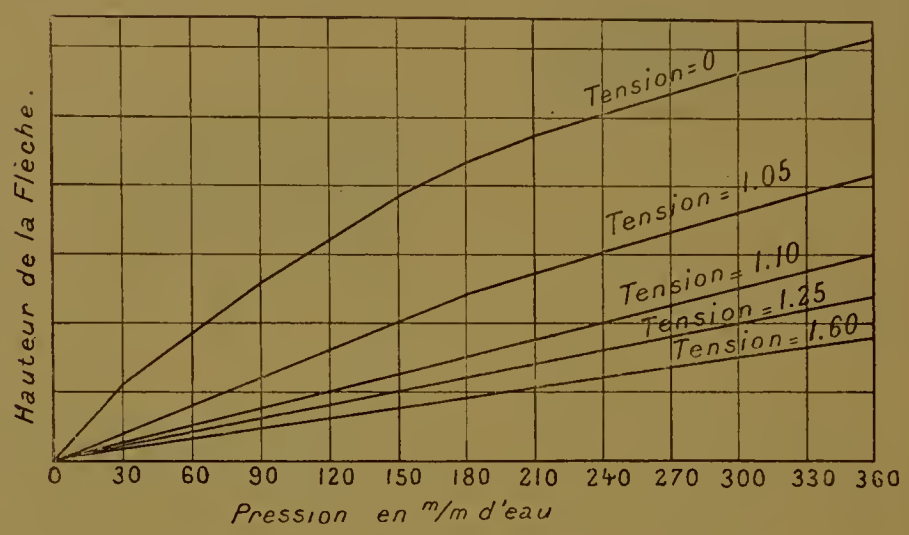


Fig. 30.

à protéger la membrane sur les bords de la cuvette et, d'autre part, à compléter la fermeture du tambour.

a) Cet appareil permet d'expérimenter sur une même membrane à des degrés de tension différents. Ainsi pour voir l'influence de la *tension* sur la marche de la flèche en fonction de la pression, on commence par couvrir le tambour avec une membrane en caoutchouc ne possédant aucune tension au départ. On produit alors dans le système (fig. 28) des pressions régulièrement croissantes par l'arrivée du mercure de la burette (B).

Si l'on met en abscisse les pressions et en ordonnées les flèches on obtient une courbe comme celle de la figure 30. (Tension zéro.)

Cette courbe se redresse de plus en plus au fur et à mesure

que la tension de la membrane au départ augmente et finalement elle devient une droite quand cette tension prend une certaine valeur 1,1, 1,25, 1,6. Cette valeur représente un point de la portion droite de la courbe donnée par la figure 26. Il est donc évident que la marche de la flèche en fonction de la pression est la même que celle des allongements en fonction du poids.

La proportionalité entre la flèche et la pression quand la membrane possède une tension au départ nous montre que le tambour à levier, étant étaloné préalablement, constitue un manomètre des plus sensibles. Mais nous verrons plus loin que l'importance de la tension est encore plus grande quand le tambour à levier doit inscrire des mouvements complexes et assez rapides.

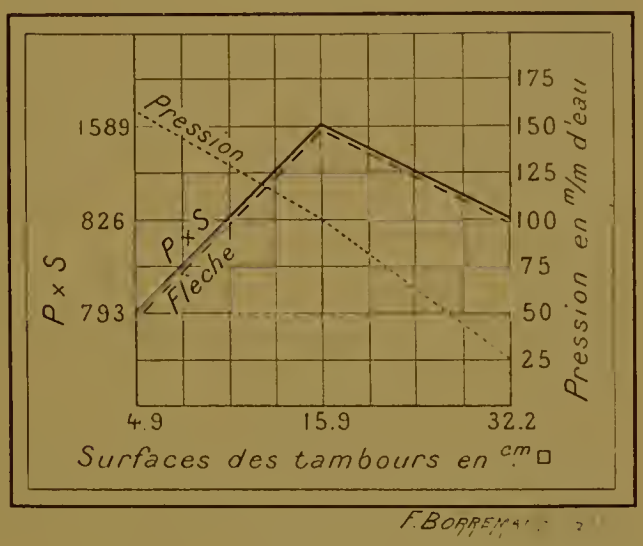


Fig. 31.

Quant à la hauteur de la flèche pour une pression donnée, elle diminue au fur et à mesure que la tension augmente.

b) *L'épaisseur* de la membrane n'est pas sans influence sur la hauteur de la flèche. Nous avons employé des membranes de différentes épaisseurs : $0^{mm},23$, $0^{mm},34$, $0^{mm},44$, $0^{mm},62$ et $0^{mm},9$. A égalité de surface, de tension et de pression la hauteur de la flèche diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de la membrane augmente.

c) *La surface du tambour*. A égalité de tous les autres facteurs (tension, épaisseur et pression) la hauteur de la flèche croît comme la surface, puisque la pression totale supportée par la membrane est d'autant plus forte que sa surface est plus grande.

Mais un autre cas peut se présenter ; il consiste à placer sur la trajet d'un même système à transmission par l'air des tambours de surface variable. L'espace total du système est ramené au même chiffre, quel que soit le diamètre du tambour, et cela peut

être facilement réalisé à l'aide du dispositif décrit plus haut (fig. 28). Nous avons employé des tambours de trois diamètres différents (65, 45 et 25 millimètres), étant tous couverts d'une même membrane de même tension. Pour des diminutions de l'espace toujours les mêmes on voit que le tambour de diamètre moyen donne la plus grande flèche parce que dans ce tambour le produit de la surface par la pression est le plus grand, comme on peut voir sur la courbe (fig. 31) dans laquelle les surfaces des tambours sont en abscisses et le produit de la surface par la pression ($P \times S$) en ordonnées.

18. — Principes de pneumatique. Volume et pression dans le système a transmission par l'air. — Soit un système composé d'une pompe (P) un tube de transmission (T) et un réservoir (R) (fig. 32), le tout étant rempli d'air et hermétiquement fermé. L'air déplacé par le piston de la pompe peut se comporter de trois manières suivant la nature des parois du système :

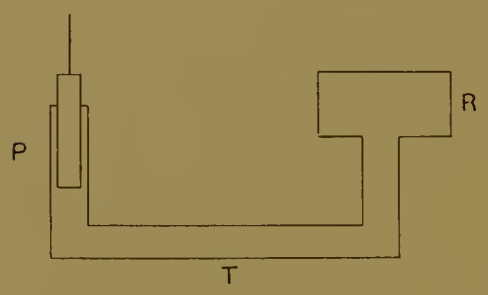


Fig. 32.

1° Quand ces parois sont complètement rigides il en résultera dans le système une pression d'autant plus forte que le volume d'air déplacé par le piston sera plus grand ;

2° Supposons que la paroi supérieure du réservoir (R) soit mobile, c'est-à-dire qu'elle puisse se déplacer sans la moindre résistance ; dans ce cas, l'air chassé par le piston pourra se loger dans le système sans se comprimer. C'est ainsi que les choses doivent se passer dans le piston recorder et dans le soufflet enregistreur de Brodie, où l'air ne subit qu'un déplacement entre l'appareil explorateur et l'appareil inscripteur ;

3° La paroi supérieure du réservoir R est élastique. Elle sera refoulée, comme dans le deuxième cas, par l'air sorti de la pompe, mais d'une quantité moindre, parce qu'une force élastique se développe dans cette paroi qui se déforme. Ce cas est réalisé par le tambour à levier dans lequel nous aurons à considérer un changement de pression et un déplacement d'air.

Nous verrons dans l'étude dynamique du tambour à levier l'importance du déplacement de la colonne aérienne.

Dans ce chapitre, nous allons examiner de plus près la relation qui existe entre les changements de volume et de pression dans le tambour à levier. Il s'agit, en effet, de savoir si la marche de la pression dans un système à transmission par l'air qui comprend un tambour à levier est semblable à celle qui se produirait dans le même système mais à parois rigides. Nous avons employé pour cela le dispositif expérimental donné par la figure 28.

Si l'on ferme le robinet R' le système est à parois rigides. On fait alors arriver dans le réservoir A des quantités de mercure toujours les mêmes (1 c.c. par exemple) et l'on inscrit les pressions correspondantes. En mettant en abscisses les quantités de mercure introduites dans le réservoir A et en ordonnées les pressions indiquées par le manomètre, on obtient la courbe donnée par la figure 33.

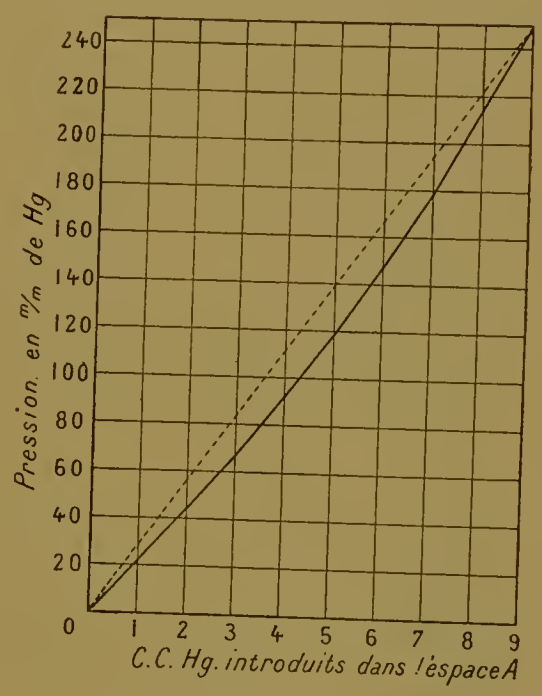


Fig. 33.

Pour expliquer cette courbe, il faut nous rappeler que la loi de Mariotte n'est pas rigoureusement exacte quand il s'agit de faibles pressions. En effet, Regnault a montré que entre 1 et 2 atmosphères, l'air se comprime un peu plus que ne le fait prévoir cette loi et par conséquent le produit du volume par la pression n'est pas une constante.

Répétons maintenant la même expérience en ouvrant le robinet R' et en ramenant le volume total au même chiffre que dans le cas précédent. On fait arriver dans le réservoir A les mêmes quantités de mercure et on lit les pressions correspondantes. La figure 34 montre la courbe que l'on obtient avec ces données.

Donc, en diminuant régulièrement l'espace d'un système à air sur le trajet duquel se trouve un tambour à levier, la pression croît

aussi d'une manière régulière. Nous pouvons assimiler cette expérience à un coup de piston décomposé en un certain nombre d'unités ayant chacune la valeur de 1 centimètre cube de mercure. La pression produite dans ce dernier cas va suivre en tout point la course du piston.

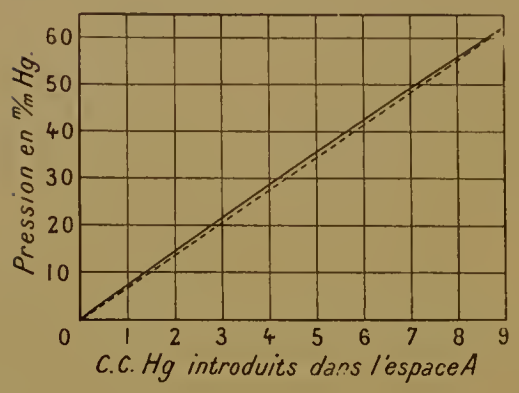


Fig. 34.

D'autre part, nous avons vu plus haut (n° 17) que la flèche du tambour croît comme la pression quand la membrane possède une tension au départ; donc cette même flèche sera proportionnelle à la course du piston (quand l'appareil explorateur est une pompe) et par conséquent proportionnelle aux forces qui agissent sur lui.

Dans ces conditions, on conçoit que ces courbes n'ont besoin d'aucune correction quant à leur signification manométrique.

19. — Résumé des recherches statiques sur le tambour à levier. Hauteur de la flèche et les causes dont elle dépend. — Les études précédentes nous ont permis de déterminer la part des divers éléments du tambour à levier sur la marche de sa flèche. Nous pouvons dire maintenant que la hauteur de cette flèche (entre les limites de fonctionnement du tambour à levier) est en raison directe du produit de la surface par la pression et en raison inverse de l'épaisseur et de la tension de la membrane et du volume total du système sur le trajet duquel est placé le tambour à levier.

Malgré la multiplicité des causes qui peuvent faire varier la hauteur absolue de la flèche, le tambour à levier peut néanmoins devenir un manomètre des plus sensibles s'il est étaloné avec exactitude avant chaque expérience.

20. — Retour a zéro de la membrane distendue. — Nous avons vu comment une membrane de caoutchouc se déforme sous l'influence de la force de pression. Il s'agit de savoir de quelle manière cette membrane ainsi distendue revient à son point de

départ. Pour cela nous avons employé le dispositif expérimental représenté par la figure 35. Le tambour T est fixé sur un support ; le tube de caoutchouc (O) qui communique avec l'intérieur du tambour est comprimé à l'aide de la pince à ressort (P).

Le levier (C) repose sur le cylindre enregistreur placé verticament. A l'aide d'une pompe on introduit dans le tambour une quantité d'air suffisante pour gonfler la membrane. Le tube de sortie étant fermé par la pince, on fait tourner le cylindre avec une assez grande vitesse et l'on ouvre brusquement la pince. Le levier trace alors la courbe du retour à zéro de la membrane.

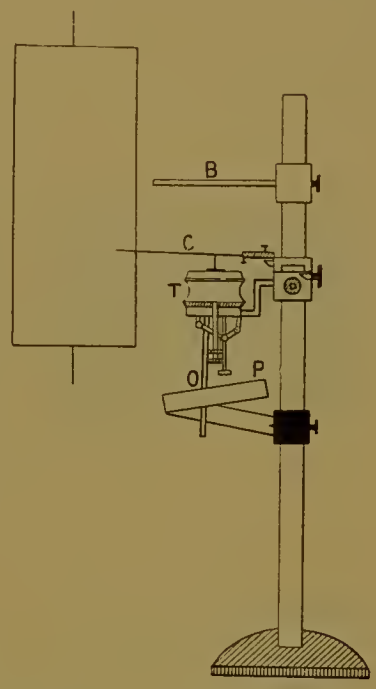


Fig. 35. — Dispositif expérimental pour étudier le retour à zéro de la membrane élastique du tambour après son gonflement. — T, Tambour dont le levier C écrit sur un cylindre enregistreur vertical. — O, Tube de sortie du tambour à levier. — P, Pince à ressort.

Cette courbe diffère suivant l'état de la membrane (épaisseur, tension, etc.). Ainsi on voit sur la figure 36 comment la tension modifie le retour à zéro de la membrane de caoutchouc. En *a* la membrane n'est pas tendue ; en *b* elle a une tension de 1-4. Dans ce dernier cas, le retour est plus rapide et la membrane fait un certain nombre d'oscillations avant de prendre sa position d'équilibre

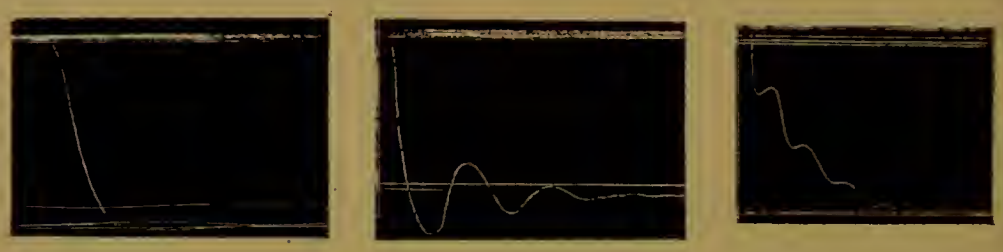
L'orifice de sortie de l'air n'est pas sans influence sur la forme de cette courbe; en effet, si l'on met sur le trajet du tube de caoutchouc un diaphragme en mince paroi dont on diminue l'ouverture jusqu'à ce que le levier dans sa descente ne dépasse pas la ligne de zéro, on obtient une courbe en escalier (*c*, fig. 36).

Ce phénomène est produit par l'action simultanée de trois causes : 1) la force élastique de la membrane; 2) la force élastique de l'air et 3) la vitesse de sortie de cet air.

21. — Etude dynamique du tambour a levier. Méthode a employer. — Nous avons vu plus haut (n° 17), dans quelles conditions il faut se placer pour que la flèche du tambour à levier soit

proportionnelle aux pressions et, par conséquent, proportionnelle aux courses du piston qui les a engendrées dans le système dont il fait partie. Il s'agit maintenant de transmettre à ce tambour un mouvement de forme connue et de voir si les ordonnées de la courbe qu'il va inscrire sont proportionnelles aux ordonnées du tracé obtenu directement sans transmission.

La méthode de Donders, employée aussi par Langendorff, Hürthle, Delarbre et Pachon, etc., avec certaines modifications, ne permet pas de dissocier dans le système à transmission par l'air la part de chacun de ses éléments constitutifs, à savoir ; l'appareil explorateur, le tube de transmission et l'appareil inscripteur. En effet, dans cette méthode, l'appareil explo-



a *b* *c*

Fig. 36.

rateur est encore un tambour à air plus ou moins semblable à l'appareil inscripteur. La membrane de cet appareil se déforme sous l'influence du mouvement qu'elle reçoit et cette déformation peut modifier la courbe que le tambour à levier doit inscrire. Dès lors, si le tracé obtenu n'est pas l'expression fidèle du mouvement, comment faire la part de chacun de ces organes? Il faut donc disposer le système à transmission par l'air qui comprend le tambour à levier que l'on étudie de manière qu'il n'y ait que la membrane de celui-ci qui se déforme sous l'influence des changements de pression.

Dans ce but, M. Marey[1] a employé une pompe comme appareil explorateur, ce qui ne change en rien la forme du mouvement que l'on veut communiquer au tambour à levier. Si cette forme

1. Marey : Premiers travaux de la Commission internationale de contrôle des instruments enregistreurs et d'unification des méthodes en physiologie. (Rapport présenté à l'assemblée générale de l'Association internationale des Académies, le 16 avril 1901.)

est modifiée, c'est dans le tambour à levier et dans le tube de transmission qu'il faut chercher la cause.

Le dispositif expérimental employé a été celui décrit plus haut (page 21, fig. 5 et 6).

Le mouvement produit par la came (C) est communiqué au piston de la pompe (P) par l'intermédiaire du levier (*a*). Sur le trajet du tube qui relie la pompe et le tambour à étudier, se trouve un manomètre à eau (M) à l'aide duquel on peut savoir la valeur de la pression correspondant à chaque point du tracé. Pour cela, on fait tourner la came très lentement et on lit les pressions correspondant aux différents rayons de cette came.

Le tube de verre du manomètre est assez étroit (1 millimètre de diamètre intérieur), afin que le changement de volume produit par le déplacement de la colonne d'eau soit négligeable par rapport au volume du système tout entier.

A l'aide d'une pince ou d'un robinet, on isole le manomètre toutes les fois qu'on veut obtenir des tracés avec le tambour à levier.

Les éléments qui prennent une part active dans le fonctionnement du tambour à levier sont la membrane et le levier avec ses articulations.

22. — Influence des divers états de la membrane (tension, épaisseur et surface) sur la forme du mouvement a inscrire. — Nous avons suivi dans cette étude la même marche que dans celle concernant l'influence des mêmes facteurs sur la hauteur de la flèche. Ils ont été étudiés isolément à égalité de tous les autres. Dans les recherches de dynamique, il faut ajouter encore l'amplitude des tracés et la fréquence du mouvement qu'il faut aussi égaliser quand on fait varier un de ces éléments seul.

a) *La tension.* Soit un tambour à levier de surface moyenne (50^{mm} de diamètre) et couvert d'une membrane de caoutchouc ayant $0^{mm},25$ d'épaisseur. Le levier inscripteur a 10 centimètres de longueur, 0 gr. 75 de poids, et une amplification de 10. On communique à ce tambour les trois formes de mouvements données par les cames décrites au n° (5) et l'on fait varier la fréquence de ces mouvements entre 5 et 180 par minute.

La figure 37 montre les tracés obtenus avec le tambour à levier

dont la membrane n'a aucune tension au départ. On voit (*b* et *c*) que la forme des mouvements complexes n'est pas fidèlement reproduite quand ils sont rapides.

Si l'on donne à cette membrane une tension suffisante (2, 8), le tambour à levier peut inscrire les mouvements les plus complexes avec leur forme exacte, aussi bien à grande qu'à faible fréquence (fig. 38).

Il faut rapprocher ce fait de ce qui se passe pour les vibrations acoustiques; on sait que la période propre d'un corps doit être au

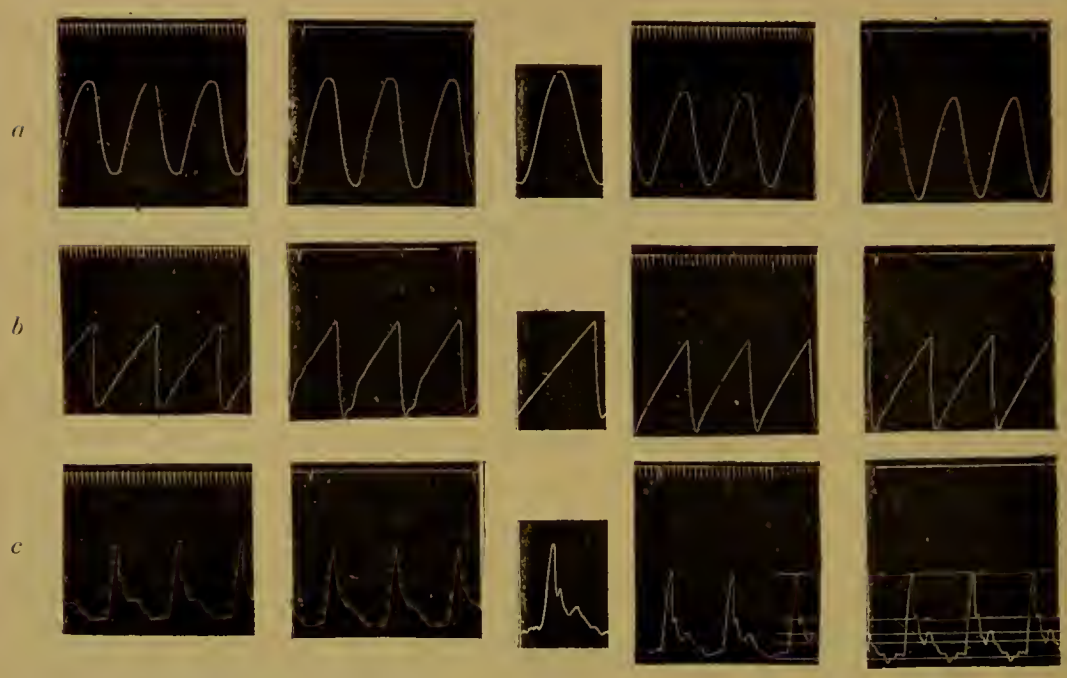


Fig. 37. T Fig. 38.

Fig. 37. — Tracés obtenus avec un tambour à levier dont la membrane en caoutchouc ne possède aucune tension au départ. — T, Tracés types des cames.

Fig. 38. — Tracés obtenus avec le tambour à levier dont la membrane en caoutchouc possède une tension 2, 4 au départ. Les parallèles du tracé (*c*) montrent les rapports entre les différentes phases du mouvement lent et rapide.

moins 50 fois plus courte que celle du son qui agit sur lui pour qu'il puisse se mettre à l'unisson. Or, par la tension, on raccourcit justement la période propre de la membrane élastique en la faisant ainsi apte à suivre les vibrations d'autant mieux qu'elle est plus tendue.

La tension est d'autant plus nécessaire que la surface du tambour est plus grande. Ainsi la figure 39 montre les tracés obtenus

avec trois tambours de diamètre différent ($a = 65^{mm}$, $b = 45^{mm}$, et $c = 25^{mm}$), étant tous couverts d'une même membrane et sans aucune tension. On voit que dans le tracé du petit tambour, la

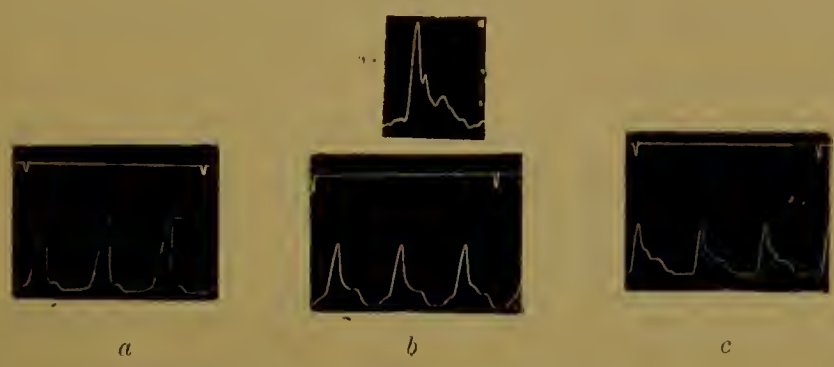


Fig. 39. — Tracés obtenus avec des tambours à levier de diamètre différent et dont la membrane élastique en caoutchouc ne possède aucune tension au départ. — Diamètre des tambours : *a*, 65mm ; *b*, 45mm ; *c*, 25mm. — T, Tracé type de la came.

forme se rapproche beaucoup plus du tracé type que dans le moyen et surtout dans le grand[1].

b) *La surface.* A égalité de tous les autres éléments du tambour à levier (tension et épaisseur de la membrane, amplification du levier), à égalité d'espace du système entier, de fréquence et d'étendue du mouvement, on voit que l'amplitude des tracés est proportionnelle jusqu'à un certain point à la surface du tambour. Cela a lieu toutes les fois que le volume du tambour lui-même est une fraction négligeable du volume total du système. Si, au

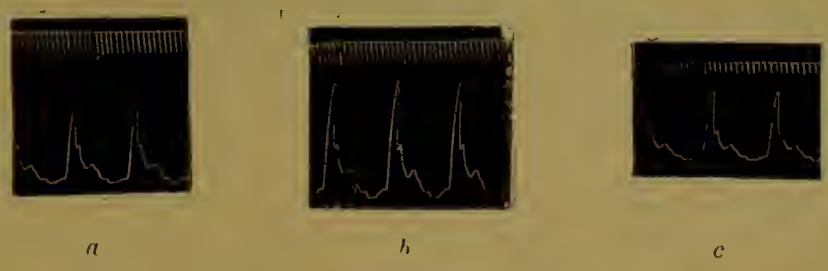


Fig. 40. — Diamètres des tambours : *a*, 65mm ; *b*, 45mm ; *c*, 25mm.

contraire, cette fraction est grande, la proportionnalité en question cesse d'avoir lieu et la plus grande amplitude est donnée par le tambour de diamètre moyen (*b*, fig. 40) parce que, dans ce

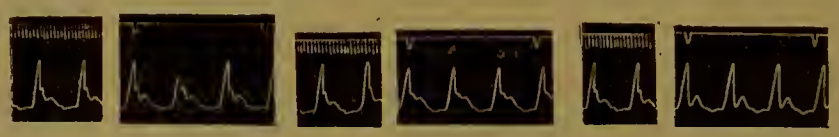
1. En ce qui concerne l'amplitude des tracés pour un mouvement d'étendue donnée, elle décroît au fur et à mesure que la tension augmente.

tambour, le produit de la surface par la pression atteint la plus grande valeur[1].

Quant à la forme du mouvement, elle est reproduite aussi bien par les grands tambours que par les petits, si les conditions qui dépendent de la membrane, et en première ligne la tension, se trouvent realisées.

c) *L'épaisseur de la membrane* n'a de l'influence que sur la hauteur des tracés qui diminue au fur et à mesure que cette épaisseur augmente.

23. — L'influence du disque qui repose sur la membrane du tambour a levier. — La grandeur du disque qui sert à attacher le levier à la membrane n'est pas indifférente pour le bon fonc-



a *b* *c*

Fig. 41.

tionnement de cette membrane. Par le fait qu'il immobilise une surface de la membrane d'autant plus grande que son diamètre est plus grand, il s'ensuit que l'amplitude des tracés décroît quand le disque augmente (fig. 41).

Ces tracés sont obtenus avec le tambour de surface moyenne (45 millimètres de diamètre) dont la membrane possède une tension de 2.8 et sur laquelle on place successivement des disques de diamètre différent ($a = 20^{mm}$ de diamètre, $b = 10^{mm}$ et $c = 5^{mm}$).

Dans toutes nos expériences, nous avons gardé un rapport déterminé entre le diamètre du disque et celui du tambour $\left(\frac{1}{10} \text{ et } \frac{1}{5}\right)$. Il n'y a aucun avantage à donner au disque des dimensions plus grandes.

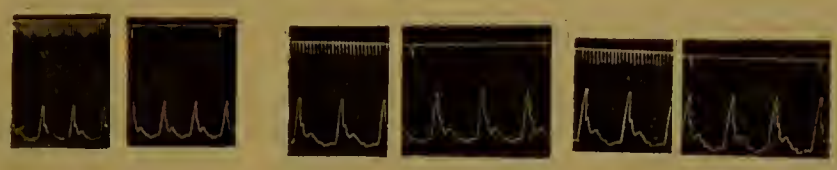
24. — Influence du levier inscripteur. Longueur, poids et amplification. — L'étude que nous avons faite sur le levier (chap. II)

1. Voir n° 17 (c).

et sur l'élasticité du corps qui lui communique le mouvement (chap. IV) s'applique aussi au levier du tambour.

a) *La longueur* du levier pour une amplification donnée n'a aucune influence dans l'inscription des mouvements, quelles que soient leur forme et leur rapidité.

b) *Le poids* du levier peut intervenir s'il dépasse certaines



2 gr. 5 gr. 10 gr.

Fig. 42.

limites. Ainsi en plaçant sur le même tambour dont la membrane présente une tension donnée des leviers de poids différents (2 gr., 5 gr. et 10 gr.) et à égalité d'amplification on obtient des tracés comme ceux représentés par la figure 42. On voit qu'il faut des poids assez grands (5 gr.,10 gr.) pour que les mouvements rapides soient altérés dans leur forme.

c) *L'amplification.* Parmi tous les éléments qui dépendent du levier, son amplification est certainement celui dont l'influence sur l'inscription a le plus d'importance. — Ainsi la figure 43

A = 10 A = 15 A = 20

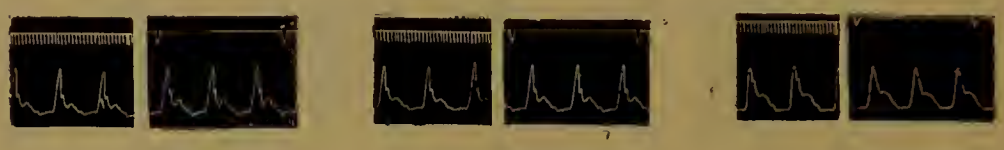
Fig. 43.

montre comment la forme des mouvements rapides est altérée quand on fait varier l'amplification du levier en lui conservant la même longueur et le même poids. Amplification = 10, 15 et 20.

Pour montrer que la vitesse du levier, qui croît nécessairement avec l'amplification, n'est pas la cause unique de la déformation des mouvements rapides, on ramène les tracés à la même hauteur pour toutes les amplifications. Cela peut s'obtenir en diminuant l'étendue du mouvement au fur et à mesure que

l'amplification du levier croît. La figure 44 montre que, même dans ces conditions, la forme du mouvement est très altérée pour l'amplification 20.

De ces recherches il résulte que l'amplification de 10 peut être considérée comme maxima quand le tambour à levier doit enregistrer des mouvements de forme complexe et dont la fréquence ne dépasse pas le chiffre de 180 par minute. Quand le mou-



A = 10 A = 15 A = 20

Fig. 44.

vement est plus rapide, cette amplification ne convient plus et il faut la réduire si l'on veut obtenir des tracés fidèles. Ainsi la figure 45 montre que le tambour à levier peut enregistrer un mouvement très complexe et très rapide (360 par minute) à la condition de réduire l'amplification du levier à 5.

d) *Les articulations du levier* doivent être des plus justes afin qu'il n'y ait ni jeu ni frottement nuisibles.

L'axe de rotation doit être sur pointes afin que la surface de frottement soit réduite au minimum. Pour attacher le levier à la

Fig. 45.

membrane nous employons une pièce en acier très légère, en forme de 8, dont les deux boucles sont ouvertes (X) (fig. 47). L'élasticité des branches de cette pièce assure un appui constant aussi bien sur le levier que sur le disque sans détruire la mobilité nécessaire entre ces deux organes. Ce dispositif remplace avantageusement les articulations à goupille, dont le réglage est très difficile.

25. — Amplitude minima et maxima des mouvements qui peuvent être fidèlement inscrits par le tambour a levier. — Il était

important de savoir entre quelles limites d'amplitude le tambour à levier pouvait reproduire d'une manière exacte la forme du mouvement qu'il devait inscrire. Nous savons que l'amplitude n'est autre chose que la flèche du segment sphérique engendré par la membrane en caoutchouc et que cette flèche croît comme le produit de la surface par la pression. Elle est en raison inverse de la tension et de l'épaisseur de la membrane et du volume total du système à transmission par l'air. En faisant varier ce volume, on peut agir facilement sur la pression et

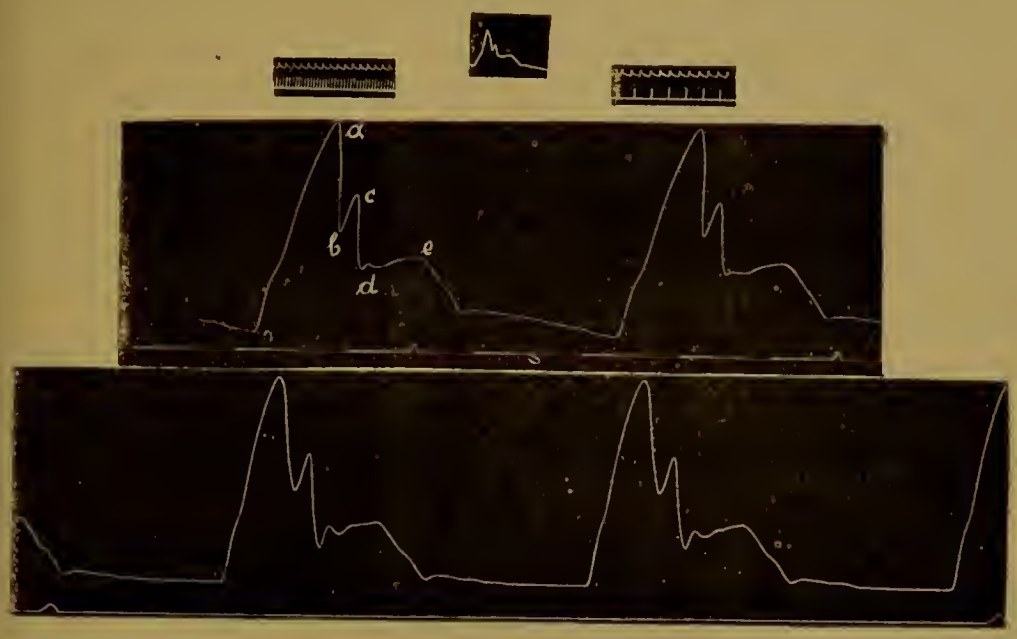


Fig. 46.

par conséquent sur la hauteur de la flèche. Pour cela on place sur le trajet du tube de transmission un réservoir à air de capacité variable. — On conçoit alors que pour un mouvement d'une certaine étendue, l'amplitude des tracés (à égalité d'amplification par le levier) sera d'autant plus faible que le volume total du système sera plus grand. De plus, on peut mesurer à l'aide du manomètre à eau les pressions correspondant à chacune de ces amplitudes. En procédant ainsi, nous avons pu inscrire fidèlement un mouvement très complexe et assez rapide entre des limites d'amplitude assez grandes comme le prouve la figure 46 ci-dessus.

Si l'on cherche la valeur absolue de la pression en chaque

point de la courbe pour ces deux amplitudes extrêmes, on trouve, en millimètres d'eau :

	AMPLITUDE minima	AMPLITUDE maxima
a) Sommet du tracé	4	220
b) Première partie de la phase descendante	2,5	98
c) Première onde dicrotique	3	118
d) Deuxième partie de la phase descendante	1	60
e) Deuxième onde dicrotique	1,5	65

Cette expérience prouve que le tambour à levier peut répondre aussi bien aux faibles pressions qu'aux fortes; cela se traduit par des différences d'amplitudes (fig. 46).

Ce qui vient d'être dit constitue la définition même de la précision du tambour à levier.

On doit, en effet, comprendre par précision de ces appareils, la propriété qu'ils doivent avoir de traduire avec la plus grande approximation possible la forme d'un mouvement à toute amplitude et à toute fréquence.

26. — Modifications apportées au tambour a levier actuellement en usage. Appareil pour la tension des membranes. — Les études

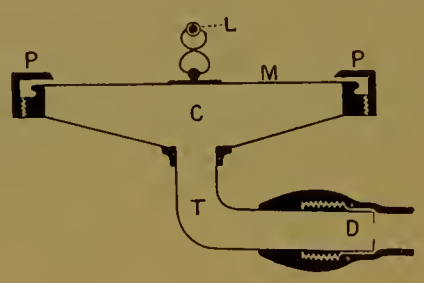


Fig. 47. — *Coupe verticale du tambour à levier modifié.* — C, Cuvette. — M, Membrane en caoutchouc. — P, Bague de protection se vissant sur la cuvette. — T, Tube de sortie de la cuvette. — D, Diaphragme percé en mince paroi et fixé sur le tube T. — L, Coupe du levier et de la pièce en X qui le relie au disque.

précédentes nous ont prouvé la nécessité qu'il y a d'introduire certaines modifications dans le tambour à levier afin que son fonctionnement soit à l'abri de causes d'erreurs.

La cuvette a été modifiée de manière à réduire sa capacité au minimum et à pouvoir la couvrir avec une membrane tendue. La figure 47 montre une coupe verticale de la cuvette (C) et de la bague (P). Au bord de cette cuvette et à l'extérieur se trouve une

gorge dans laquelle la membrane est attachée. Au-dessous de cette gorge il y a une saillie circulaire et filetée sur laquelle va se visser la bague (P). Le rôle de cette bague est de protéger la membrane sur le bord de la cuvette. De plus ce bord ayant une largeur de 2 millimètres environ, la membrane se trouve comprimée assez fortement par la bague, ce qui assure la fermeture du tambour.

Le tube de transmission (T) débouche dans le fond de la cuvette et il sert en même temps à fixer la cuvette sur sa monture (fig. 48) ou dans l'appareil à tension. A son extrémité libre se trouve le diaphragme (D) percé en mince paroi.

La monture (fig. 48) se compose d'une virole ouverte (V) servant à fixer l'appareil sur la tige support. Sur cette virole en forme

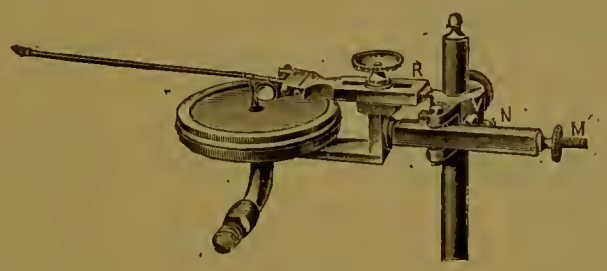


Fig. 48.

de chape s'articule tout le système de la monture pour la mise en contact du style sur le cylindre enregistreur. La correction s'obtient par la vis tangente (N). Le déplacement d'avant en arrière s'obtient par la vis (M) dispositif analogue à celui qui se trouve dans le tambour de M. Chauveau. La pièce (R) supportant le levier est fendue longitudinalement, ce qui permet de remplacer la cuvette par une autre de diamètre différent et de changer l'amplification du levier.

L'appareil à tension. La figure 49 montre la photographie de l'appareil et la figure 50 une coupe verticale.

Une pièce métallique en forme d'étrier (A) est traversée par la vis (B). L'extrémité supérieure de cette vis est percée d'un trou dans lequel pivote librement la pièce (C) qui est pourvue d'un plateau sur lequel on fixe la cuvette (E). L'anneau métallique (F) de l'étrier (A) a une largeur de 12 millimètres environ et une épaisseur de 8 millimètres. A l'extérieur de cet anneau se trouve un pas de vis qui permet de visser la bague (I). La membrane de

caoutchouc (M) est serrée entre l'anneau (F) et la bague (I) et sur cette membrane on dessine un carré de côté connu. La pièce (C) et la cuvette qu'elle supporte se trouvant en dessous de la membrane, on comprend que si l'on tourne la vis (B) le tout va monter et la membrane pourra être tendue de plus en plus. On uniformise cette tension en gardant toujours la forme du carré dessiné sur la membrane et le rapport entre la surface finale et la surface initiale de ce carré nous donne le degré de tension.

Quand cette tension est jugée suffisante, on applique une liga-

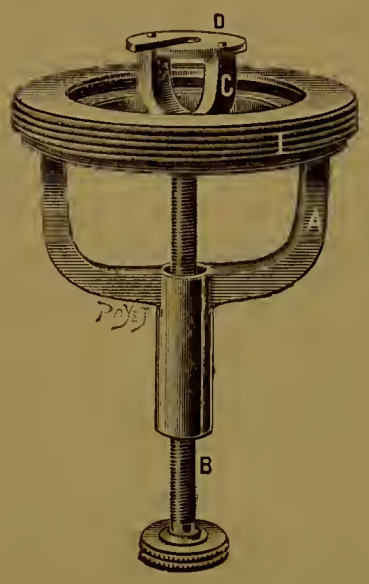


Fig. 49.

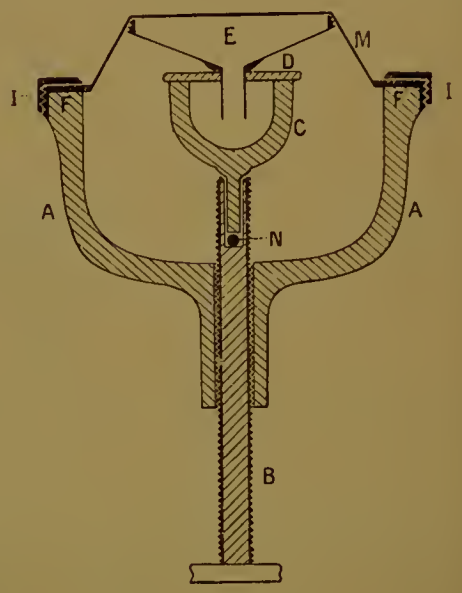


Fig. 50.

Fig. 49. — Appareil permettant de couvrir la cuvette du tambour à levier avec une membrane en caoutchouc de tension connue.

Fig. 50. — Coupe verticale de l'appareil pour la tension des membranes en caoutchouc.

ture dans la gorge de la cuvette et l'on découpe la membrane assez près de la ligature. La bague (P) est vissée sur la cuvette et celle-ci se trouve de cette manière couverte par une membrane de tension connue.

27. — Tambour a levier a membrane en celluloid. — Blix[1] a remplacé le caoutchouc dans le tambour à levier par du celluloïd qui offre le grand avantage d'être moins altérable par le temps. Les

1. Blix. Neue Registrirapparaten. *Arch. f. d. Gesammte Physiol.* 1902, XC, 405-420.

membranes sont ondulées et jouissent d'une élasticité suffisante, quoique les limites de cette élasticité soient beaucoup plus restreintes que celles des membranes en caoutchouc.

Nous avons soumis ce tambour aux mêmes épreuves que celui à membrane en caoutchouc en cherchant d'abord la relation entre la

Fig. 51. — *Tambour à levier de Blix* (membrane en celluloïd).

flèche et la pression et en lui communiquant ensuite des mouvements de forme connue à des amplitudes et des fréquences différentes.

La flèche croît comme la pression, phénomène semblable à celui que nous avons vu pour le tambour à membrane en caoutchouc.

Dynamiquement, le tambour de Blix s'est montré assez fidèle pour les mouvements d'étendue moyenne, comme on peut voir sur les tracés donnés par la figure 52. Il reproduit moins bien que le

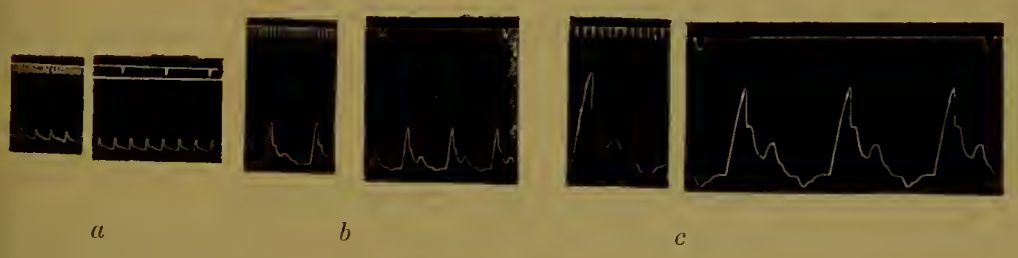


Fig. 52. — Tracés obtenus avec le tambour à membrane en celluloïd.

tambour à membrane en caoutchouc les mouvements faibles (*a*) ou les mouvements forts (*c*) figure 52.

28. — Etude sur le fonctionnement des appareils inscripteurs autres que le tambour a levier. Le piston recorder et le soufflet enregistreur de Brodie. — Tout en inscrivant des mouvements qui leur sont communiqués par l'intermédiaire d'une colonne d'air, ces appareils diffèrent quant à leur fonctionnement du tambour à levier. En effet, nous savons que dans celui-ci l'air subit à la fois une com-

pression et un léger déplacement tandis que dans le piston recorder et le soufflet enregistreur de Brodie, l'air ne fait que se déplacer entre l'appareil explorateur et la partie mobile de l'inscripteur. La compression peut être réduite à zéro dans les pistons recorders à contre-poids. (Pistons recorders d'Ellis et de Hürthle.) Mais elle peut atteindre une certaine valeur quand les parties mobiles de ces appareils ne ne sont pas parfaitement équilibrées (piston recorder de Blix-Sandström, couvercle du soufflet enregistreur de Brodie).

Nous pouvons donc appeler ces inscripteurs *appareils à déplace-*

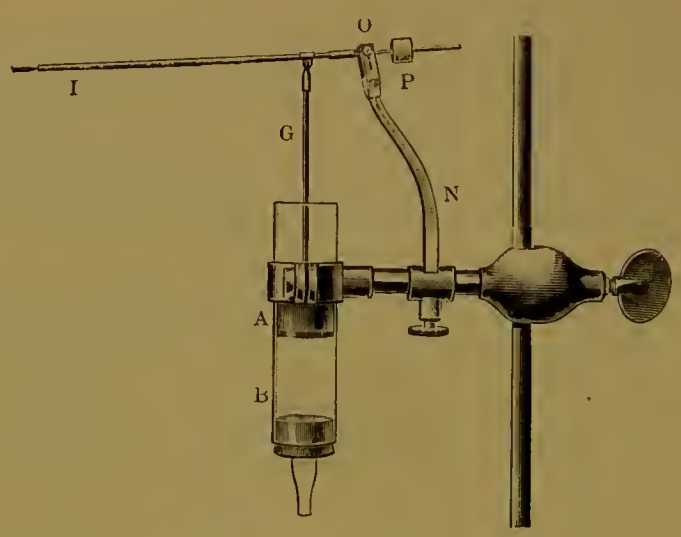


Fig. 53. — *Piston recorder d'Ellis.*

ment d'air et c'est bien l'étendue de ce déplacement et les variations de sa vitesse qu'ils vont enregistrer.

a) *Le piston recorder d'Ellis*[1] (fig. 53) se compose d'un tube vertical en verre (B) dans lequel se trouve un piston en parafine (A). La tige de ce piston (G) est attachée au levier (I) à l'aide d'une articulation; cette tige et le levier sont en paille. En O le levier est articulé à la pièce métallique N et il est équilibré à l'aide d'un contre poids (P). L'extrémité inférieure du tube (B) est reliée par un tube de caoutchouc à l'appareil explorateur.

Quand le piston recorder réunit toutes les conditions qu'exige son bon fonctionnement, on lui communique un mouvement de forme connue dont on fait varier la fréquence et l'étendue. On voit

1. Ellis (F.-W.) : Description of a piston recorder for air connections. *Journ. of. Physiol.*, 1886, vol. vii, 309-313.

alors que ce piston recorder peut traduire assez exactement la forme du mouvement (fig. 54) s'il est suffisamment fort, et entre des limites de vitesse très restreintes.

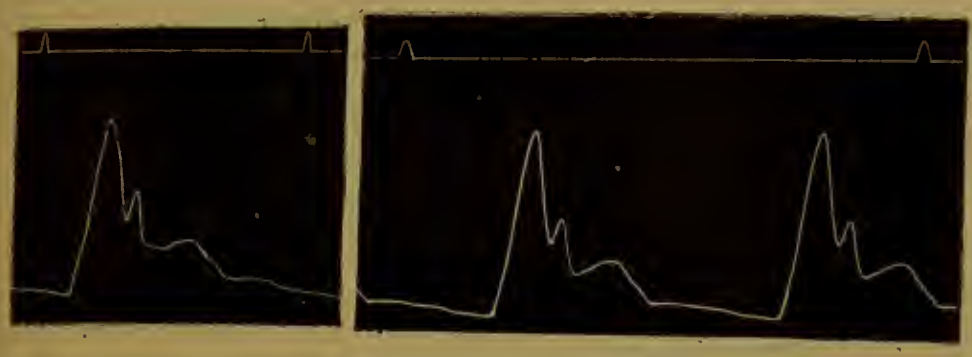


Fig. 54. — Tracés obtenus avec le piston recorder d'Ellis.

Les mouvements faibles, de même que les mouvements trop lents ou trop rapides ne peuvent pas être inscrits fidèlement avec cet appareil. La cause doit être cherchée dans l'inertie du levier

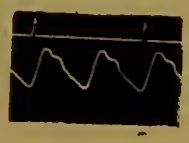


Fig. 55.

et du piston d'une part, dans les frottements de celui-ci d'autre part. Ainsi la figure 55 montre le tracé de ce même mouvement quand son étendue diminue.

b) *Le piston recorder de Hürthle*[1] (fig. 56). Dans cet appareil,

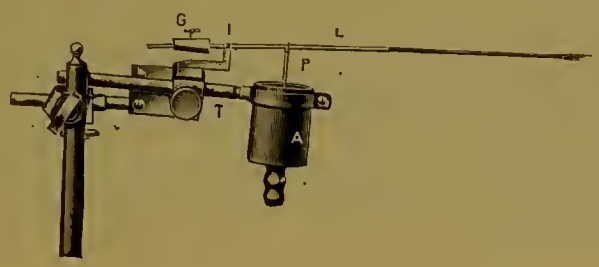


Fig. 56. — *Piston recorder de Hürthle.*

le cylindre (A) qui constitue le corps de pompe est métallique et le piston est en ébonite. La tige P est articulée d'une part au piston et d'autre part elle est attachée au levier (L) au moyen d'un an-

1. Hürthle (K.) : *Arch. f. d. Gesammte Physiol.*, 1893, LIII, 301.

neau en caoutchouc. Le levier est articulée en I et il est équilibré par le contre-poids (G). Le cylindre A est fixé à l'aide de la tige T maintenue par une vis de pression et qui permet de changer

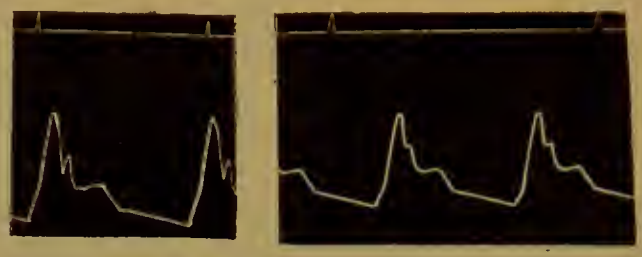


Fig. 57. — Tracés obtenus avec le piston recorder de Härthle.

l'amplification du levier. Cet appareil fonctionne sensiblement dans les mêmes conditions que celui d'Ellis, comme les tracés donnés par la figure 57 le prouvent.

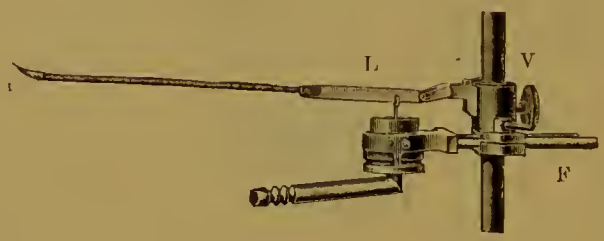


Fig. 58. — *Piston recorder de Blix-Sandström.*

c) *Le piston recorder de Blix-Sandström* (fig. 58). Le cylindre et le piston sont en acier et l'ajustage est des plus parfaits. La tige L est articulée d'une part avec le piston et d'autre

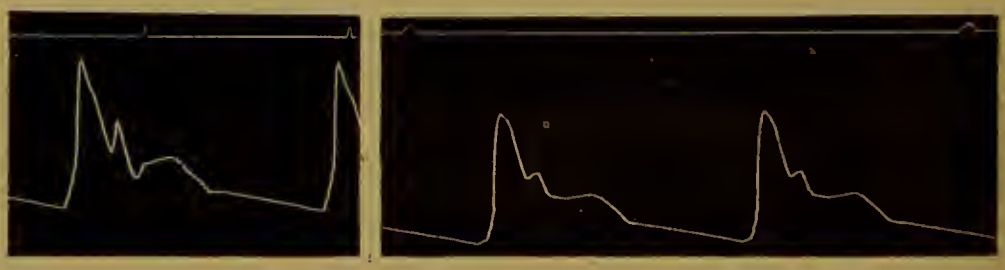


Fig. 59. — Tracés obtenus avec le piston recorder de Blix-Sandström.

part avec le levier inscripteur. L'appareil est fixé sur la monture au moyen de la fourche F et une vis de pression (V).

La figure 59 montre les tracés obtenus avec cet appareil pour lequel il faut faire les mêmes réserves que pour les deux autres quant aux limites de son fonctionnement.

d) *Le soufflet enregistreur de Brodie*[1] (fig. 60). Cet appareil se compose d'une plaque métallique rectangulaire (A) qui est fixe et qui porte le tube T au moyen duquel on établit la communication entre cet appareil et l'explorateur. Au-dessus se trouve une autre

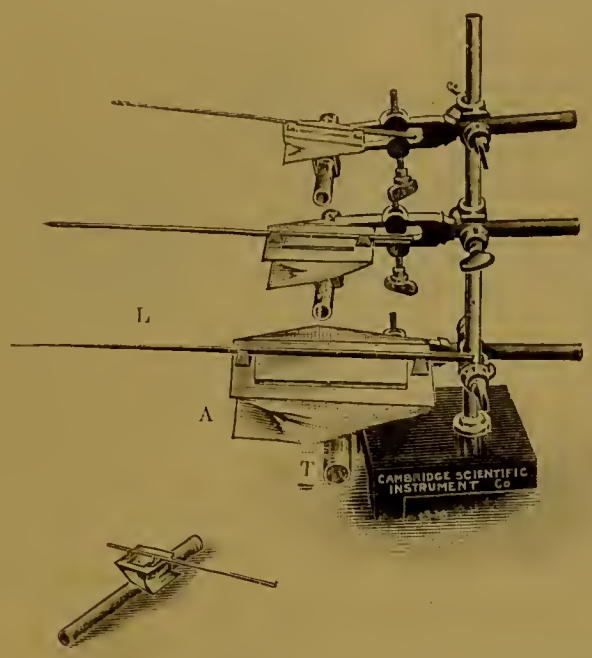


Fig. 60. — *Soufflet enregistreur de Brodie.*

plaque (formée d'un cadre en aluminium, sur laquelle se trouve collée une feuille de papier) de mêmes dimensions que la plaque fixe et qui est articulée avec celle-ci. Tout autour de ces deux plaques se trouve, collée, une membrane en baudruche qui ferme l'espace qu'elles laissent quand on les écarte d'un certain angle.

Fig. 61. — Tracés obtenus avec le soufflet enregistreur de Brodie.

Sur la plaque supérieure est fixée la plume L (en bois très léger) et qui suit les mouvements de cette plaque.

1. Brodie (T. G.) : On recording variations in volume by air transmission. A new form of volume-recorder. *Journ. of Physiol.*, 1902, vol. XXVII, 473-487.

Si l'on communique à cet appareil un mouvement de forme connue, on voit que, au delà d'une certaine amplitude et d'une certaine fréquence qui ne sont pas bien grandes, la forme de ce mouvement est altérée (fig. 61).

La cause de ces altérations doit être cherchée dans l'inertie de la partie mobile de l'appareil qui devient d'autant plus manifeste que l'amplitude et la fréquence du mouvement sont plus grandes[1].

Il résulte des expériences précédentes que les appareils inscripteurs à déplacement d'air sont loin d'égaler le tambour à levier quant à la fidélité de leurs indications. Tout en supposant réduits au minimum la masse des pièces mobiles et leurs frottements, il reste encore des obstacles que la colonne d'air qui se déplace rencontre dans les tubes des transmissions (frottement contre les parois, passage à travers les orifices de diamètre différent, etc.) dont l'influence croit comme l'amplitude et la fréquence du mouvement. *Ils ne peuvent donc pas traduire exactement la forme d'un mouvement à toute amplitude et à toute fréquence comme le tambour à levier.*

VIII

Les tubes de transmission. Diaphragmes.

29. — Les conduits qui relient l'appareil explorateur (la pompe dans notre dispositif) à l'appareil inscripteur peuvent modifier la forme de l'ébranlement qu'ils transmettent par leur diamètre intérieur et par leur longueur.

a) *Le diamètre intérieur.* Si l'on prend un tambour à levier construit dans les conditions décrites plus haut et que l'on relie ce tambour à l'appareil explorateur au moyen de tubes de diamètre différent on voit qu'à partir d'une certaine rapidité le mouvement est altéré dans sa forme. Prenons par exemple un tube ayant 7 millimètres de diamètre intérieur et 1 mètre de longueur, et faisons varier la rapidité du mouvement. On obtient pour un mouvement de forme et d'étendue données des tracés comme ceux que la figure 62 montre.

1. L'articulation est faite au moyen d'une feuille de baudruche.

A grande fréquence, la forme du mouvement est profondément altérée. Rendons maintenant la rapidité du mouvement constante et faisons varier le diamètre du tube (bien entendu à égalité de

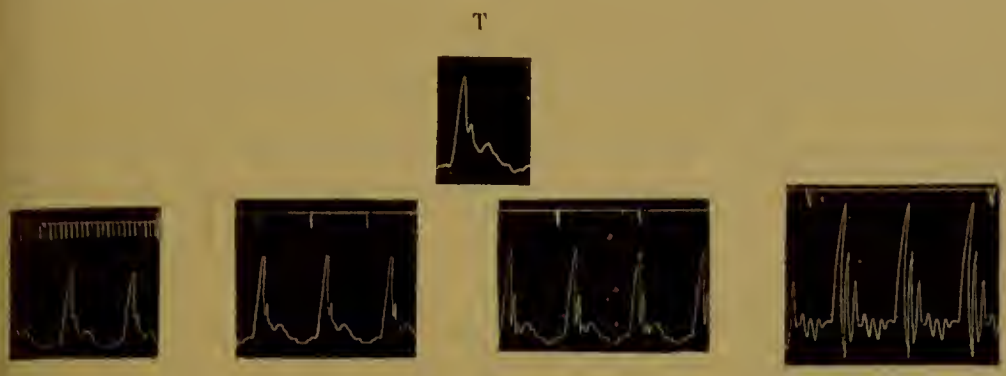


Fig. 62.

longueur). On voit sur la figure 63 que la forme du mouvement est différente dans les tubes étroits (2^{mm} et 3^{mm}) et dans les tubes larges (4^{mm} et 5^{mm}).

Dans les premiers, les oscillations du mouvement sont effacées

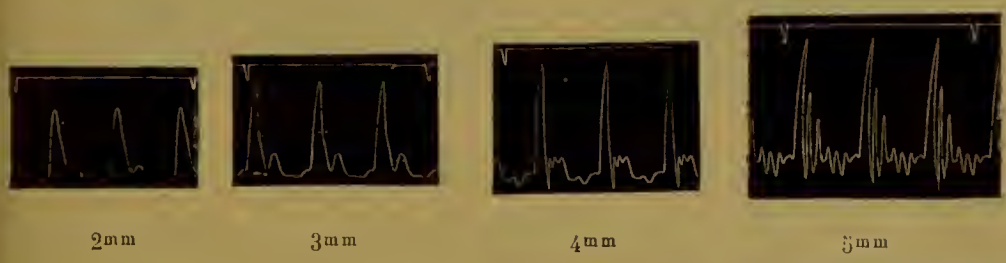
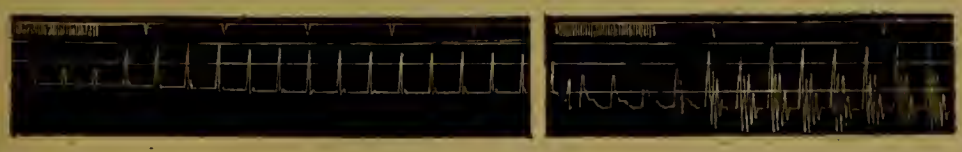


Fig. 63.

par le frottement trop grand de la colonne d'air contre les parois du tube; dans les seconds ces oscillations sont accentuées par l'inertie des organes de transmission.



a Fig. 64. *b*

Parmi ces organes il faut distinguer : le tambour à levier et la colonne d'air. Pour bien déterminer la part de chacun de ces éléments, nous avons fait les expériences suivantes :

1° On empêche le levier de décrire toute sa course (à l'aide d'une cale) comme Buisson l'a fait pour contrôler le sphygmographe et l'on fait varier la fréquence du mouvement. On voit alors (*a*, fig. 64) que le levier est projeté d'une certaine quantité quand le mouvement est rapide.

On répète l'expérience en enlevant la cale et, pour les mêmes vitesses, on obtient le tracé donné par la figure 64 (*b*). La projection du levier dans ce dernier cas n'est pas plus grande que dans le premier, ce qui devrait avoir lieu si son inertie était seule en cause.

2° On enlève le levier du tambour et l'on inscrit optiquement

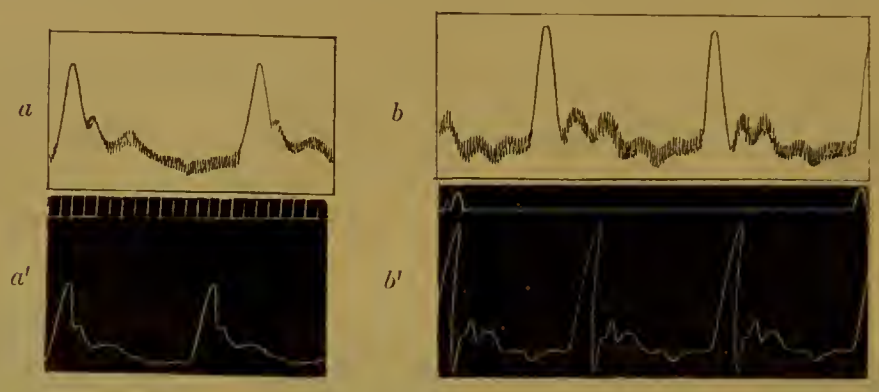


Fig. 65.

les oscillations de la membrane en faisant varier la rapidité du mouvement. On obtient les tracés donnés par la figure 65 *a* et *b*. En *a'* et *b'* de la même figure sont les tracés obtenus avec le même tambour muni de son levier inscripteur (Long. Lev. $=10^{cm}$; poids $=0$ gr. 75; amplification $=10$) et dans les mêmes conditions de fréquence du mouvement.

La ressemblance qui existe entre ces deux sortes de tracés prouve que le levier (dans les conditions de longueur, de poids et d'amplification mentionnés plus haut) inscrit très fidèlement la forme du mouvement que la membrane lui communique. Comme cette membrane remplit toutes les conditions nécessaires pour obéir fidèlement aux vibrations qu'elle reçoit, il s'ensuit que la déformation du mouvement a lieu dans le tube de transmission lui-même et la cause de cette déformation est l'inertie de la colonne d'air en mouvement.

3° Pour prouver que la force vive $\left(F = \frac{mV^2}{2}\right)$ de cette colonne d'air est la cause principale des dites déformations, on remplace l'air du système tout entier par des gaz de densité différente. On voit alors (fig. 66) que l'amplitude et la forme des tracés n'est pas la même suivant que le milieu de transmission est l'air (*a*), l'acide carbonique (*b*) ou l'hydrogène (*c*).

Tous les physiologistes ont remarqué que dans la transmission des mouvements rapides on voit se produire des vibrations parasites. Ces vibrations disparaissent lorsqu'on rétrécit le diamètre du tube d'une façon suffisante. Dans ce but, M. Chauveau[1] se sert d'un robinet placé sur le trajet du tube de transmission. MM. Binet et Courtier[2] ont imaginé une sorte de diaphragme comme

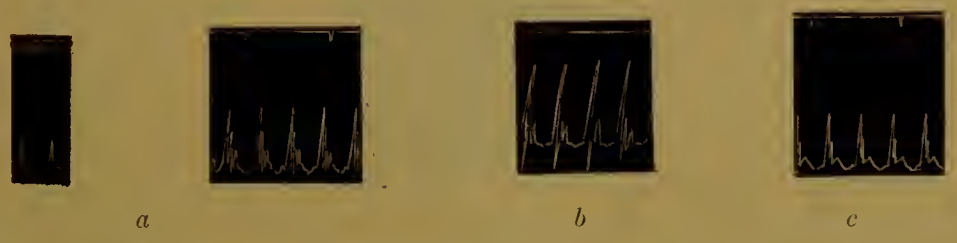


Fig. 66. — Influence de la densité des gaz sur la transmission de mouvement. — *a*, air; *b*, acide carbonique; *c*, hydrogène.

dans les systèmes optiques et dont on peut faire varier à volonté l'ouverture.

Le diaphragme percé en mince paroi nous a donné le meilleur résultat et l'expérience nous a montré qu'il y a une relation assez étroite entre le diaphragme et le diamètre du tambour.

Il faut que le diamètre de cet orifice soit $\frac{1}{50}$ environ de celui du tambour.

Si l'on place un pareil diaphragme sur le trajet du tube (de 7 mm de diamètre intérieur) qui a servi à l'expérience (*a*, n° 29) on voit (fig. 67) que la forme du mouvement est très exactement reproduite, quoique la rapidité soit assez grande (3 par seconde). Nous avons vu plus haut (n° 24, fig. 45) que des mouvements encore plus rapides (6 par seconde) peuvent être inscrits très

1. Chauveau : *C. R. Soc. Biol*, 1895.
2. Binet et Courtier : Un régulateur graphique. *C. R. Soc. Biol.*, 1895, 320-322.

exactement à l'aide du tambour à levier. Dans ce cas, le diaphragme dont le diamètre serait $\frac{1}{50}$ de celui du tambour est très suffisant.

Comme la grandeur du diaphragme est en quelque sorte indépendante de la rapidité du mouvement, du moins dans les limites où nous avons opéré (de 30 à 360 par minutes), on conçoit la possibilité, dans la pratique, de munir le tambour à levier du diaphragme qui lui convient et qui restera à demeure. Le tambour à levier représenté par la figure 48 possède sur son tube de sortie un pareil diaphragme.

b) *La longueur du tube* peut introduire des retards dans la

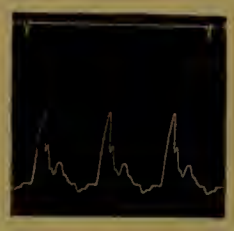


Fig. 67.

transmission du mouvement, comme MM. Marey[1] et Chauveau[2] l'ont montré. Si cette longueur est trop grande, le frottement de la colonne aérienne contre les parois peut altérer aussi la forme du mouvement.

Les parois des tubes de transmission (s'ils sont en caoutchouc) doivent être assez épaisses pour ne pas être exposées à se déformer par l'effet des chocs extérieurs. Dans les cas où les instruments inscripteurs sont soumis à des mouvements brusques qui pourraient avoir une influence sur la capacité de ces tubes, il est bon d'envelopper ceux-ci d'un tissu inextensible qui tout en leur conservant une certaine flexibilité n'en permet ni la dilatation ni l'allongement.

Enfin tout tube de transmission doit être pourvu d'une soupape

1. Marey : *La Méthode graphique dans les sciences expérimentales.* Paris, Masson. 1 vol., p. 345 et 478.

2. Chauveau (A.) : Sur la méthode chronostylographique et ses applications à l'étude de la transmission des ondes dans les tuyaux. — *C. R. Acad. des Sciences*, t. CXVIII, p. 115.

pour mettre à volonté la capacité intérieure des appareils en rapport avec la pression atmosphérique.

IX

Les appareils explorateurs.

30. — Ces appareils, étant destinés à prendre le mouvement sur l'organe qui le produit, doivent avoir des formes spéciales suivant la région à explorer. Les adaptations dans la forme des explorateurs ont entraîné des changements dans le principe même de leur fonctionnement. Ainsi, dans les uns, la phase active du mouvement se traduit par une pression positive (sonde cardiaque, cardiographe, sphygmographe à transmission, etc.); dans d'autres, cette pression est négative (pneumographe). Les uns sont remplis d'air; d'autres sont remplis de liquide (sphygmoscope, manomètre métallique, etc.). Il fallait donc réaliser pour chacun de ces appareils toutes les conditions de son fonctionnement habituel.

En observant strictement cette règle, nous remplaçons la pompe par les différentes sortes d'explorateurs sans rien changer aux autres éléments du système (tubes de transmission, tambour inscripteur, etc., etc.). De cette manière on peut voir la part qui revient aux explorateurs eux-mêmes dans la transmission des mouvements de forme connue.

Les tracés ainsi obtenus seront comparés soit aux tracés types des cames, soit à ceux que l'on obtient quand la pompe sert d'explorateur.

Pour faciliter cette étude, nous avons divisé les appareils explorateurs en trois classes [1] :

1° Explorateurs à air et à pression positive;
2° Explorateurs à air et à pression négative;
3° Explorateurs à liquide.

31. — Explorateurs a air et a pression positive. — *Les cardiographes* sont parmi tous les explorateurs les plus rapprochés de la

1. Nous renvoyons aux mémoires originaux pour la description de tous ces appareils.

pompe, aussi bien par leur forme que par leur fonctionnement. Nous pouvons, en effet, considérer le disque qui repose sur la membrane de cet explorateur comme le piston, et la cuvette comme le corps de pompe. Quand on remplace la pompe par un cardiographe ou tout autre appareil semblable, il faut déterminer le rapport entre le diamètre de son disque et celui du piston puisque, à course égale, la quantité d'air déplacée est en raison directe de ce diamètre.

a) *Le cardiographe de Marey*[1]. On prend d'abord un tracé avec la pompe comme explorateur (fig. 68). On remplace ensuite la pompe par le cardiographe en ayant soin de donner au disque

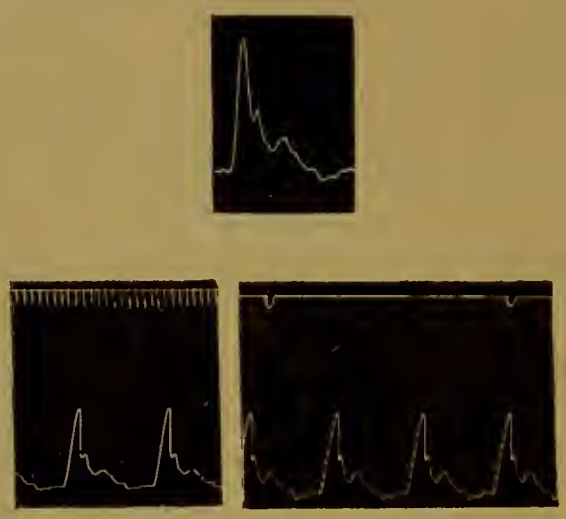


Fig 68.

le même diamètre que celui du piston, et de ramener l'espace du système entier à la même capacité. La figure 69 représente les tracés obtenus dans ces conditions.

Si l'on compare ces tracés à ceux de la figure 68, on voit que non seulement leur amplitude est moindre, mais encore que les rapports entre les différentes phases du mouvement sont changés. L'explication de ce fait doit être cherchée dans la déformation subie par la membrane de cet explorateur. A l'état de repos, cette membrane est distendue par un ressort placé à l'intérieur de l'appareil.

Supposons que le cardiographe soit ouvert et que l'on exerce sur son disque une pression supérieure à la force élastique de

1. Marey : *La Circulation du sang*, 1881, p. 149.

ce ressort, la membrane peut être rendue plane ; mais dans cet état sa tension est plus faible. Quand, au contraire, cet appareil fait partie d'un système fermé, la membrane peut être déformée

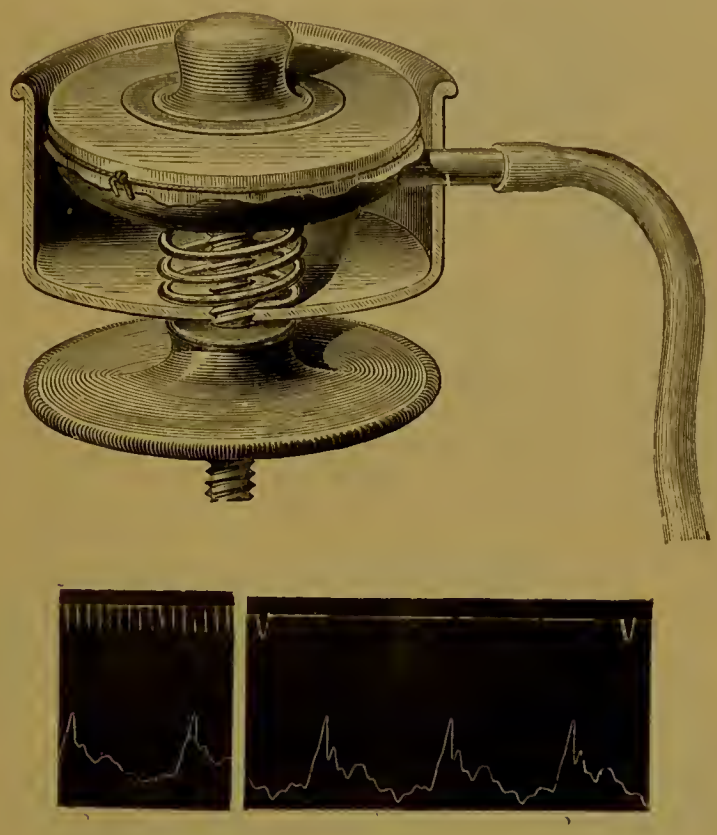


Fig. 69. — Cardiographe de Marey.

par la pression intérieure comme le montre la figure 70, déformation qui sera d'autant plus prononcée que la résistance opposée dans cet endroit sera plus faible par rapport aux autres points

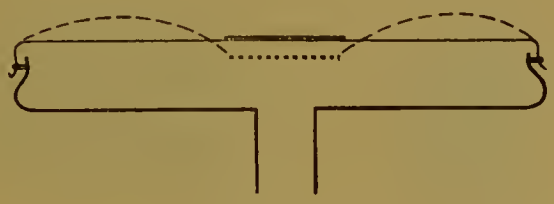


Fig. 70.

du système. Une partie de l'air chassé par le disque peut être logée dans le cardiographe même et alors les ordonnées du tracé ne sont plus proportionnelles aux rayons de la came.

On peut remédier à ce défaut de deux manières : a) en augmen-

tant le diamètre du disque et dans ce cas le cardiographe est une vraie pompe; b) en faisant que la force élastique de la membrane du cardiographe soit supérieure à celle du tambour à levier, si l'on

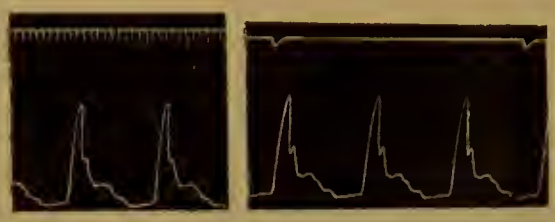


Fig. 71.

conserve au disque de cet explorateur ses dimensions habituelles.

Par l'un ou l'autre de ces deux procédés, on ramène le tracé à sa forme normale (fig. 71).

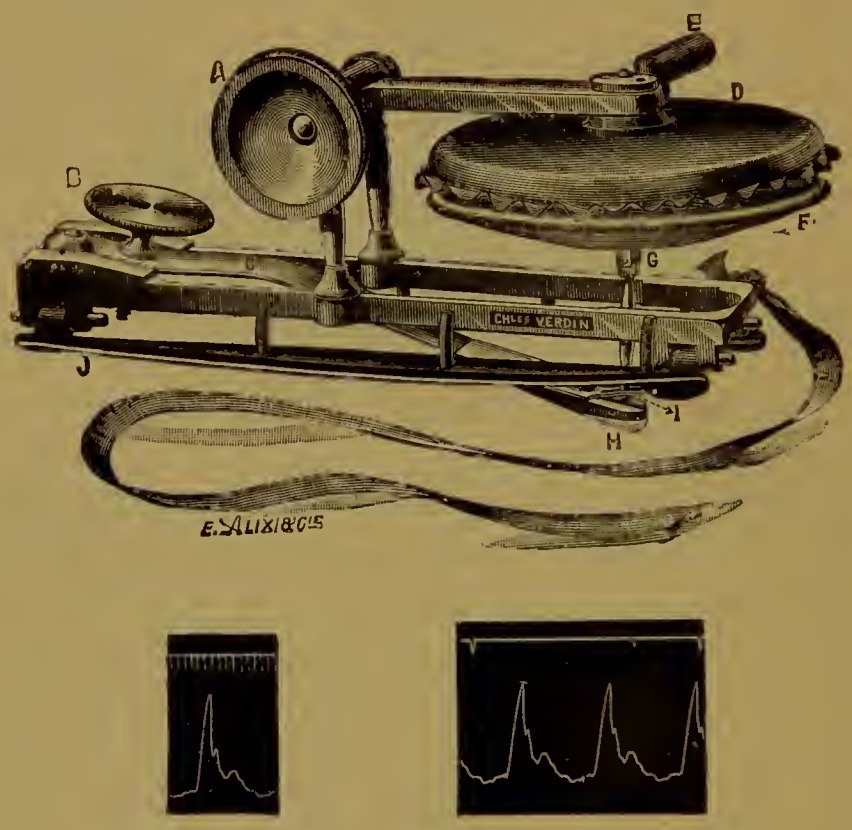


Fig. 72. — Sphygmographe à transmission de Marey.

Ce que nous venons de dire pour le cardiographe de Marey s'applique en tous points aux autres explorateurs semblables (sphygmographe à transmission, pneumographe, myographe à

transmission, etc.). Nous avons pu examiner quelques-uns de ces explorateurs.

b) *Les sphygmographes à transmission de Marey*[1] (fig. 72), *le pansphygmographe de Brondgeest*[2] (fig. 73), *la pince sphygmographique de Laulanié*[3] (fig. 74), placés dans les conditions mentionnées plus haut, transmettent très fidèlement au tambour à levier les mouvements qu'ils ont reçus, comme on peut voir sur les tracés qui accompagnent ces figures.

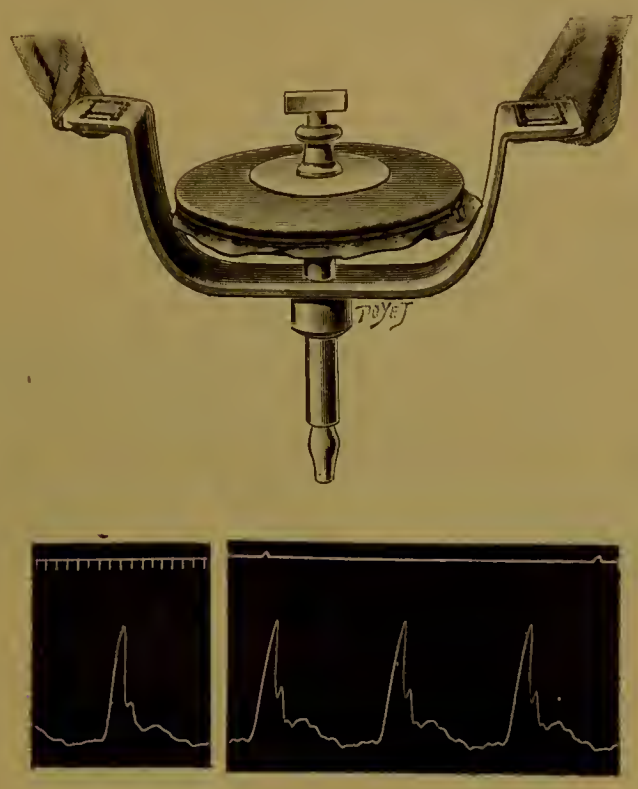


Fig. 73. — Pansphygmographe de Brondgeest.

c) Mlle Pompilian[4] a apporté certaines modifications très importantes à ce genre d'explorateur. Les ressorts tenseurs sont placés à l'extérieur et leur tension est rendue réglable. De cette manière, on peut connaître avec une approximation suffisante la pression que l'on exerce sur la région à explorer. De plus, on peut dans

1. Marey : *La Circulation du sang*, 1881, p. 221.
2. Brondgeest (P.-Q.) : *De pansphygmograaf*, Utrecht, 1873, p. 29.
3. Laulanié.
4. Pompilian (M.) : De quelques nouveaux appareils enregistreurs. *Trav. du Laboratoire de M. Ch. Richet*, 1902, V, 476-490.

une série d'expériences faites avec un de ces appareils se placer toujours dans les mêmes conditions.

La figure 75 représente le cardiographe et la figure 76 le sphygmographe à transmission de Mlle Pompilian et les tracés obtenus avec ces appareils.

32. — Explorateurs a air et a pression négative. — *Pneumographe*

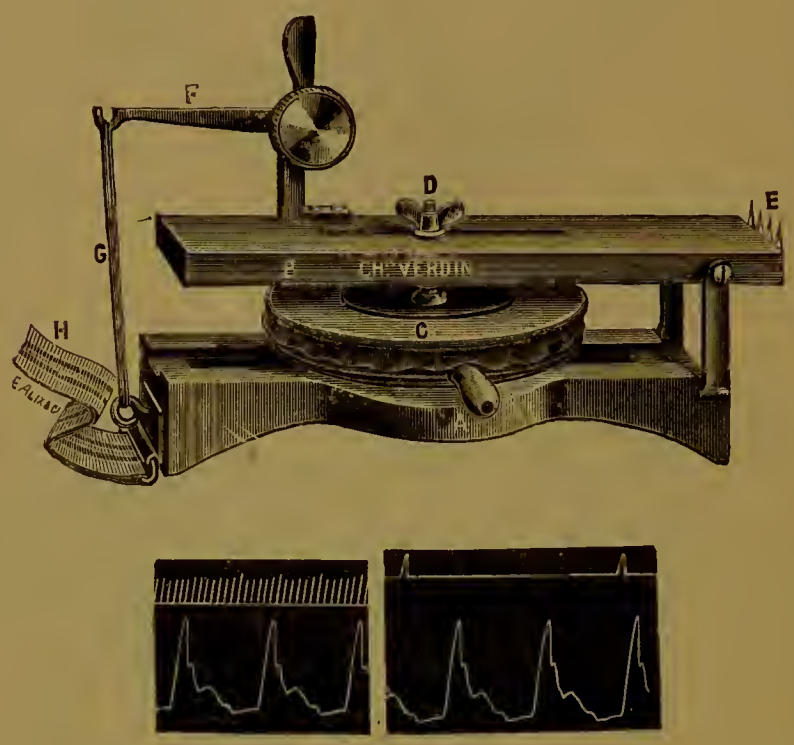


Fig. 74. — Tracés obtenus avec la pince sphygmographique de Laulanié.

de Marey[1]. Dans cet appareil, la membrane est tirée vers l'extérieur dans la phase active du mouvement (Inspiration); l'air du système subit une raréfaction et la plume du tambour inscripteur trace la courbe au-dessous de la ligne de zéro (fig. 77).

La forme du mouvement est tout aussi bien reproduite par le tambour à levier si les conditions qui dépendent de l'explorateur sont réalisées.

En redressant ces tracés à l'aide d'un miroir, on peut les

1. Marey (J.) : *La Circulation du sang*, 1881, p. 769.

comparer aux tracés types de la came ou à ceux obtenus quand l'appareil explorateur est une pompe.

33. — Explorateurs a liquide. — La membrane élastique de ces appareils reçoit le mouvement par l'intermédiaire d'un milieu incompressible et l'on conçoit que cette membrane suive toutes les oscillations de ce milieu. Les pressions produites dans la chambre

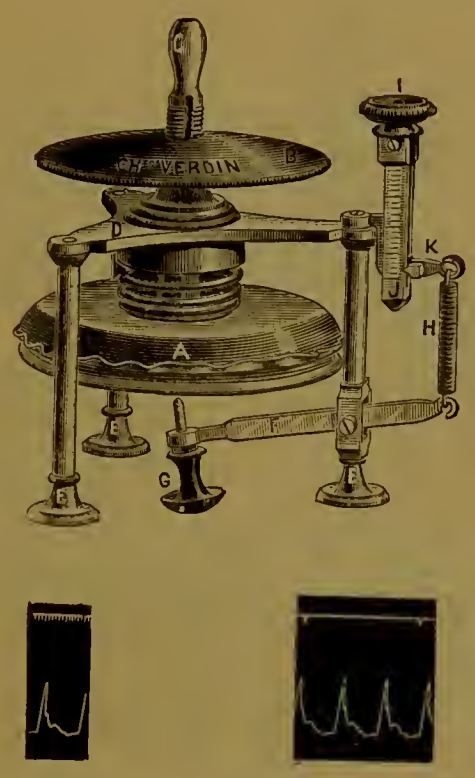


Fig. 75. — Cardiographe de Mlle Pompilian.

à air de ces explorateurs seront toujours proportionnelles aux pressions qui ont lieu dans la colonne liquide. Quand le tracé donné par le tambour à levier n'est pas l'expression fidèle du mouvement initial, ce n'est pas dans l'exploratenr qu'il faut chercher la cause, mais dans la colonne liquide elle-même.

a) *Le sphygmoscope de Chauveau et Marey*[1]. Pour étudier cet appareil, nous l'avons mis en relation avec une pompe dont le piston a 6 millimètres de diamètre. Le sphygmoscope, la pompe

1. Marey : Du mouvement dans les fonctions de la vie, 1868, p. 152.

et le tube qui les relie sont remplis d'eau. La figure 78 représente les divers types de sphygmoscopes et les tracés obtenus quand la chambre à air de cet appareil est en relation avec un tambour à levier dont l'exactitude a été préalablement déterminée. Comme on peut voir sur la figure 78, la forme du mouvement est très fidèlement reproduite.

b) *Le sphygmoscope de Fredericq*[1]. Dans cet appareil, la chambre

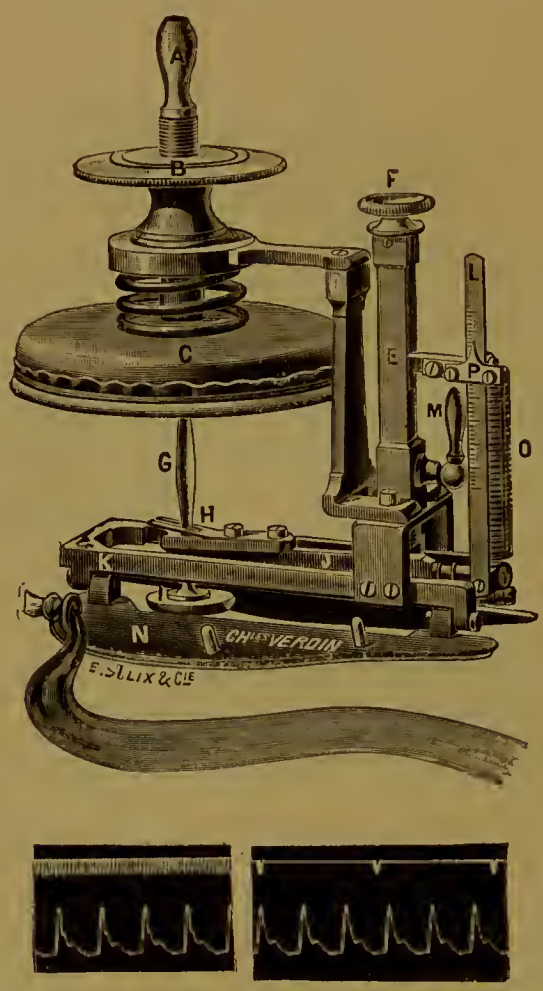


Fig. 76. — Sphygmographe à transmission de Mlle Pompilian.

à air est réduite au minimum. Ses indications (fig. 79) sont absolument analogues à celles données par le sphygmoscope de Marey.

c) *Le sphygmoscope de Hürthle*[2] s'éloigne des autres par le fait

1. Fredericq : *Éléments de physiologie humaine*, 1893, p. 101.
2. Hürthle (K.) : Beiträge zur Hämodynamik. Achte Abhandlung; Kritik des Lufttransmissionsverfahrens. *Arch. f. d. Gesammte Physiol.*, 1892, LIII, 281-329.

que la chambre aérienne est un tambour (L, fig. 80) ayant une membrane élastique (G). Le mouvement de la colonne liquide est communiqué d'abord à la membrane (G) et de là au disque

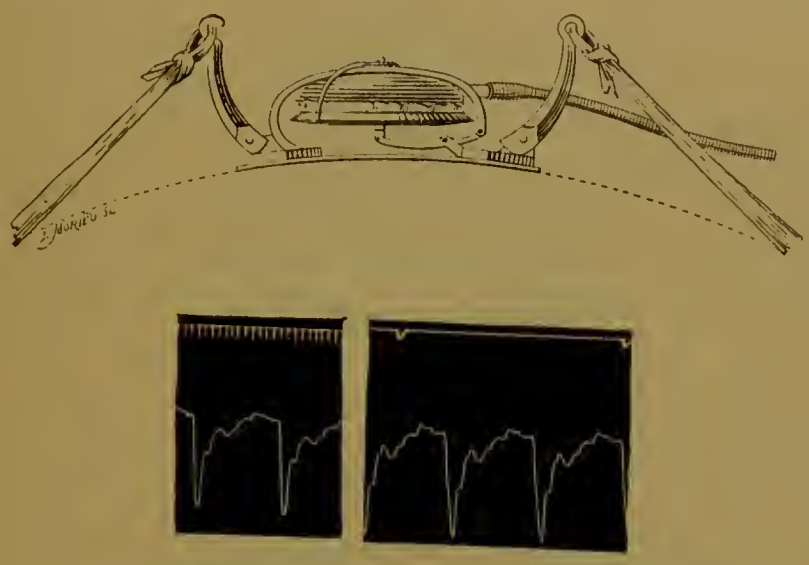


Fig. 77. — Pneumographe de Marey.

du tambour à air (L) par l'intermédiaire de la pièce métallique (K). Si la membrane de ce tambour à air ne remplit par les

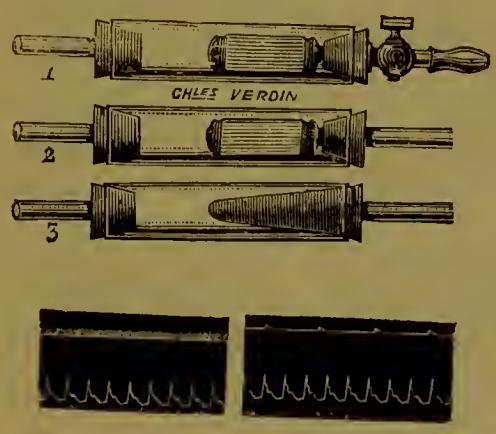


Fig. 78. — Sphygmoscope de Chauveau et Marey.

conditions décrites plus haut (voir n° 31), la forme du mouvement peut être altérée (fig. 80).

d) *La sonde cardiaque de Chauveau et Marey*[1]. — Cet appareil ressemble à un sphygmoscope dans lequel la chambre à liquide serait

1. Chauveau et Marey : *Mém. Ac. Méd.*, 1863, t. XXVI, p. 268.

devenue chambre à air et où la surface extérieure de la membrane élastique serait entourée de liquide d'où elle reçoit le mouvement.

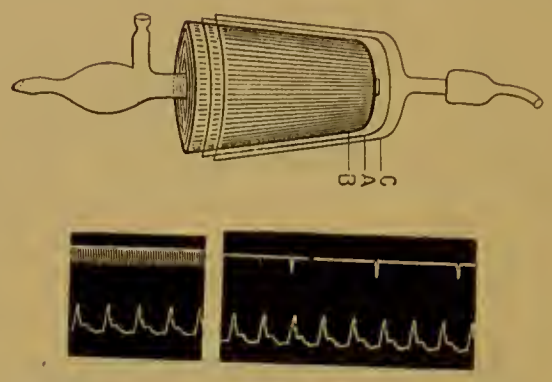


Fig. 79. — Sphygmoscope de Fredericq.

Donc, le fonctionnement de la sonde cardiaque est analogue à celui

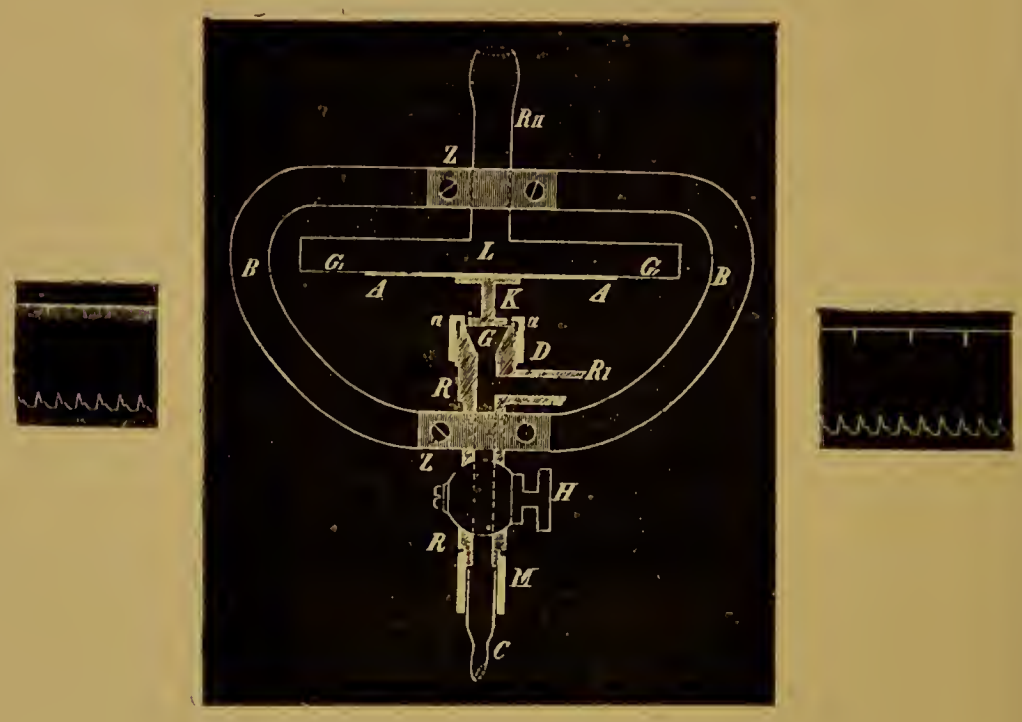


Fig. 80. — Sphygmoscope de Hürthle.

du sphygmoscope et la figure 81 montre les tracés obtenus avec cet explorateur.

34. — La transmission par l'air considérée dans son ensemble. — L'étude que nous avons faite sur les divers éléments qui

composent le système à transmission par l'air nous conduit à formuler quelques règles générales applicables au système entier.

1° *Il faut que le système à transmission par l'air soit très étanche.* Le meilleur moyen pour s'en assurer est de placer en dérivation sur le trajet du système un manomètre, généralement le manomètre à eau ;

2° Si la capacité du système est trop faible par rapport à l'étendue du mouvement, on peut, sans inconvénient, mettre sur

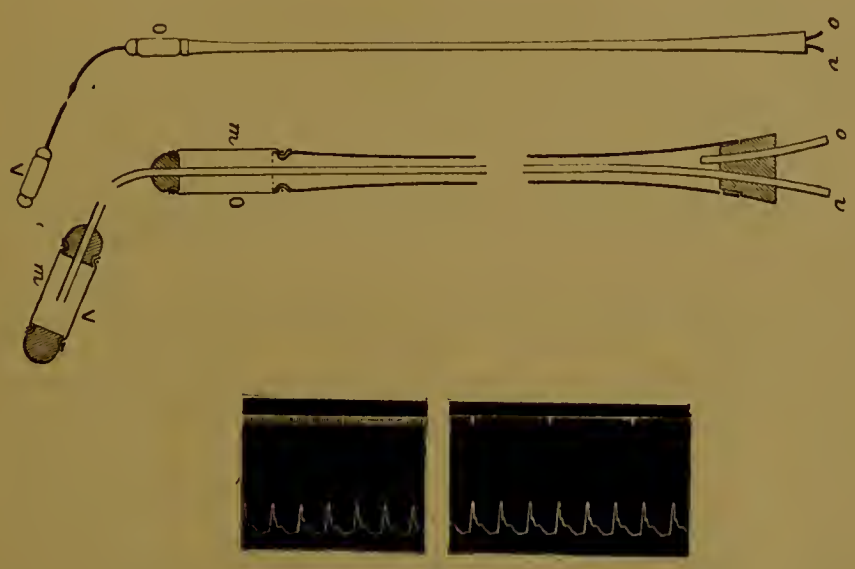


Fig. 81. — Sonde cardiaque de Chauveau et Marey.

le trajet un réservoir à air dont on règle la capacité suivant le le besoin ;

3° Tout système à transmission par l'air doit être mis en équilibre de pression avec le milieu ambiant avant chaque expérience. Cette opération peut être faite à l'aide d'un robinet à trois voies ou à l'aide d'une soupape. Dans tous les cas, il faut que la fermeture soit hermétique ;

4° Le système à transmission par l'air doit être à l'abri de toute vibration étrangère qui pourrait troubler la forme du mouvement à enregistrer. De même, il faut éviter les variations brusques de température pendant la durée de l'expérience.

X

LA CHRONOPHOTOGRAPHIE

35. — Nous avons vu jusqu'ici comment on peut enregistrer un phénomène à l'aide d'un levier amplificateur et nous avons examiné de près les sphygmographes à ressort et les appareils à transmission par l'air. Mais il y a de nombreux cas où cette méthode ne saurait suffire. Citons parmi les plus importants :

1° Ceux où l'on veut avoir la trajectoire du mobile tout entier ;

2° Ceux pour lesquels la force du mobile est trop faible pour mettre en mouvement des masses, si petites qu'elles soient;

3° Ceux où la vitesse du mouvement est trop grande par rapport aux phénomènes d'inertie que les masses en mouvement peuvent opposer;

4° Ceux où le corps en mouvement est inaccessible ou quand l'étendue de ses mouvements est trop grande.

L'inscription par la chronophotographie, grâce à sa précision, est venue perfectionner la méthode graphique et remplacer avec grand succès la chronostylographie dans les cas mentionnés plus haut.

La première application de la photographie à l'étude des mouvements remonte à 1865 quand Onimus et Martin ont pu fixer les positions initiale et finale du cœur pendant une révolution cardiaque.

Mais ces auteurs ne pouvaient se faire aucune idée des mouvements du cœur, n'ayant pas les phases intermédiaires entre ces deux positions.

En 1873, Jansen se servit de la photographie pour fixer les positions successives de la planète Vénus à différents instants de son passage sur le disque du soleil et il inventa dans ce but son revolver astronomique.

En 1877, Marey et Lippmann ont pu inscrire photographiquement les oscillations de la colonne mercurielle de l'électromètre capillaire que M. Lippmann venait d'inventer.

Les progrès de la photographie instantanée ont permis à Muybridge de photographier divers animaux en mouvement et de saisir la succession des phases de leurs allures. La méthode employée par Muybridge était la suivante : il disposait en face de la piste une série d'appareils photographiques dont les obturateurs étaient maintenus fermés par des électro-aimants. Le sujet en expérience rompait le circuit de ces électro-aimants et, par conséquent, ouvrait l'obturateur quand il passait devant l'appareil photographique.

Mais, dans cette méthode, la notion du temps faisait complètement défaut. Il appartenait à M. Marey de faire une application rationnelle de la photographie à l'étude des mouvements. Les premiers travaux faits à l'aide de la chronostylographie lui ont prouvé que l'inscription par style offre des limites bien restreintes.

C'est alors que M. Marey eut recours à l'inscription par la lumière et les appareils qu'il a inventés lui ont permis de réunir facilement sur la même épreuve photographique les deux éléments constitutifs de tout mouvement : à savoir l'espace et le temps. Il dota ainsi la physiologie expérimentale d'une méthode extrêmement précise, qui est la *chronophotographie*.

Les résultats que cette méthode a donnés entre les mains de son auteur sont trop connus pour qu'il soit nécessaire d'en faire un long exposé. Les mouvements de vitesse moyenne ont été les premiers dont l'étude a pu être faite à l'aide de la chronophotographie vu le mécanisme des appareils dont on disposait.

Mais M. Marey a poussé plus loin les limites de cette vitesse et il a pu appliquer la chronophotographie à l'analyse des mouvements très lents ou très rapides.

36. — I. La chronophotographie des mouvements lents. — Pour ce genre d'étude, les appareils actuellement en usage suffisent et il n'y a que le dispositif expérimental qui peut varier suivant la nature du phénomène que l'on étudie.

Ainsi la figure 82 (pl. I) montre l'installation employée pour chronophotographier l'ouverture d'une fleur de volubilis.

Un chronophotographe de Marey (C) est relié au treuil T, qui, à son tour, est actionné par le poids P. Sur l'axe qui relie ces deux appareils se trouve une ailette (L) dont une des extrémités

repose sur la tige verticale (E) en face de laquelle se trouve un électro-aimant (F). Sur le circuit de cet électro-aimant, on intercale le basculateur à eau (B) dont le fonctionnement est assuré par le réservoir à niveau constant (R). On comprend facilement que la fermeture du courant fourni par l'accumulateur (V) produit l'attraction de la tige (E) vers l'électro-aimant (F) et laisse libre l'ailette (L). L'appareil se met à tourner jusqu'à ce que l'ailette (L) soit de nouveau arrêtée par la tige (E). Pour un tour complet de l'axe qui relie le chronophotographe au treuil, on peut avoir une image ou plusieurs images, suivant le besoin.

Les intervalles de temps entre deux images successives se trouvent réglés par la vitesse d'oscillation du basculateur.

La figure 83 (pl. I) représente une série de seize photographies prises pendant une heure et qui montre les phases successives de l'ouverture de la fleur de volubilis.

Quand la durée du phénomène à suivre est plus grande, de plusieurs jours par exemple, et pour ne pas interrompre l'expérience pendant la nuit, on a recours à une source de lumière artificielle. La figure 84 (pl. II) montre le dispositif expérimental qui a servi à MM. Bull et Pizon pour étudier le développement d'une colonie de Botrylles.

Un système d'horlogerie (A) actionne le chronophotographe (B) auquel est adapté le microscope (C). La préparation (D) est éclairée au moyen du bec Auer (E) à veilleuse et dont l'éclairage est rendu intermittent par un électro-aimant en relation avec le chronophotographe. En (F) se trouve un réservoir destiné à renouveler l'eau quand les sujets d'expérience sont des animaux aquatiques.

L'expérience peut durer plusieurs jours et l'on a pu obtenir sur une pellicule de 15 à 20 mètres de longueur toutes les phases du phénomène. On peut voir sur la figure 85 (pl. II) le commencement, la fin et quelques phases intermédiaires du développement d'une colonie de Botrylles.

37. — II. La Chronophotographie des mouvements rapides. — A). Quand la durée d'un phénomène est inférieure à une seconde $\left(\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1.000}, \text{etc., de seconde}\right)$ les appareils actuels ne peuvent pas suffire, car le nombre d'images qu'ils peuvent donner

pendant une seconde ne dépasse pas le chiffre de 25 à 30 en moyenne.

Or l'analyse d'un mouvement par la chronophotographie est d'autant plus complète que le nombre de phases saisies est plus grand.

En réduisant la largeur de l'image, M. Marey est arrivé à obtenir jusqu'à 110 photographies par seconde.

Sans changer le principe des chronophotographes employés jusqu'à présent, à savoir la marche de la pellicule avec arrêt pour le temps de pose et l'éclairage intermittent obtenu au moyen d'un disque fenestré, on peut obtenir une fréquence d'image plus grande si l'on modifie les organes qui entraînent la pellicule. Ainsi l'appareil représenté par la figure 86 (pl. III) peut donner facilement 140 images par seconde et avec des intervalles assez réguliers pour faire la synthèse du mouvement par la projection animée.

Dans cet appareil, l'entraînement de la pellicule est réalisé par deux cylindres (C et C') qui tournent dans le sens des flèches. Sur la circonférence de l'un de ces cylindres (C) se trouvent 8 méplats qui rendent la marche de la pellicule intermittente. A l'aide de multiplications par des engrenages, ces cylindres peuvent faire 17-18 tours par seconde. En (B) se trouve un compresseur qui assure l'arrêt net de la pellicule toutes les fois qu'elle n'est pas entraînée par les cylindres. Devant la fenêtre (F) cette pellicule est aussi légèrement comprimée pour éviter les vibrations qu'elle pourrait avoir en grande vitesse. La réserve (R) de pellicule se trouve dans la petite boîte supérieure. Dans cette même boîte, la pellicule est guidée et débitée au moyen de deux cylindres lamineurs (D et K) dont l'un (D) reçoit le mouvement de la manivelle par une transmission à courroie (fig. 88, pl. IV).

Après avoir été impressionnée, la pellicule tombe dans la boîte inférieure (L) où se trouve un système analogue au précédent et qui assure la descente de la pellicule. Le cylindre (M) reçoit le mouvement de la manivelle par la même courroie disposée comme le montre la figure 88.

Avec cet appareil nous avons pu prendre 18 images (figure 87, pl. III), pour un coup d'aile de pigeon, qui s'effectue dans $\frac{3}{20}$ de seconde, comme le prouve le chronoscope placé dans le champ photographique.

Ce même appareil a servi pour la chronophotographie microscopique. Cette étude a été faite par M. Noguès qui s'est servi du dispositif représenté par la figure 88 (pl. IV).

Le soufflet photographique (S) relie le microscope (M) au chronophotographe (C). La lumière donnée par la lampe à arc (B) à réglage automatique est concentrée au moyen de 3 condensateurs (un, placé dans la lanterne, le second (A) placé entre la lanterne et le disque (D), et le troisième est le condensateur Abé du microscope). Pour diminuer la durée de l'éclairement, assurer son uniformité et avoir le meilleur rendement, le disque fenestré (D) se trouve placé sur le trajet du faisceau lumineux à l'endroit où il est le plus mince. Le mouvement lui est transmis par l'axe (O). La platine du microscope étant mobile on peut, à l'aide des transmissions I et I', déplacer la préparation.

La figure 89 (pl. IV) montre les mouvements des cils vibratiles du manteau de la moule, dans deux préparations différentes. On peut ainsi avoir 18-20 images pour un mouvement complet d'un cil vibratile.

B) L'analyse par la chronophotographie du vol des insectes a beaucoup préoccupé M. Marey dans ces dernières années et en suivant cet ordre d'idées il a cherché les moyens nécessaires à une pareille étude. Il a eu recours d'abord à la méthode stroboscopique qu'il ne tarda pas à perfectionner en introduisant l'étincelle électrique comme source de lumière [1].

Au moyen de cette méthode, M. Bull a fait des études sur l'aile artificielle et il a pu photographier les mouvements des ailes d'une tipule captive et reconstituer toutes les phases d'un coup d'aile.

L'importance de ces premiers résultats ne pouvait pas échapper à M. Marey et, avec la collaboration de M. Bull, il a pu apporter à la chronophotographie un nouveau perfectionnement.

Comme la durée de l'étincelle électrique est très courte, on conçoit qu'il est possible d'en produire pendant une seconde un très grand nombre.

1. On sait que MM. Marey et Lippmann ont employé les premiers l'étincelle électrique pour chronophotographier la colonne mercurielle de l'électromètre capillaire. (Marey : *Le Mouvement*, t. I, p. 49); Mach : *Sitzungsbericht d. Kais. Akad. d. Wissensch.*, Wien, 1887, Bd. XCV, et Boys : *Revue générale des Sciences*, 1892, n° 9, se sont servi aussi de l'étincelle électrique pour photographier les projectiles.

Sa brièveté d'une part, son pouvoir photogénique d'autre part, font que la surface sensible peut être animée d'un mouvement continu et que, malgré cela, on peut obtenir des images très nettes.

La réalisation du synchronisme entre la marche de la pellicule et la production des étincelles électriques a pu être obtenue à l'aide du dispositif représenté par la figure 90 (pl. V) et dont la description a été donnée par M. Bull[1].

« Dans une boîte A se trouve un cylindre B monté sur un axe

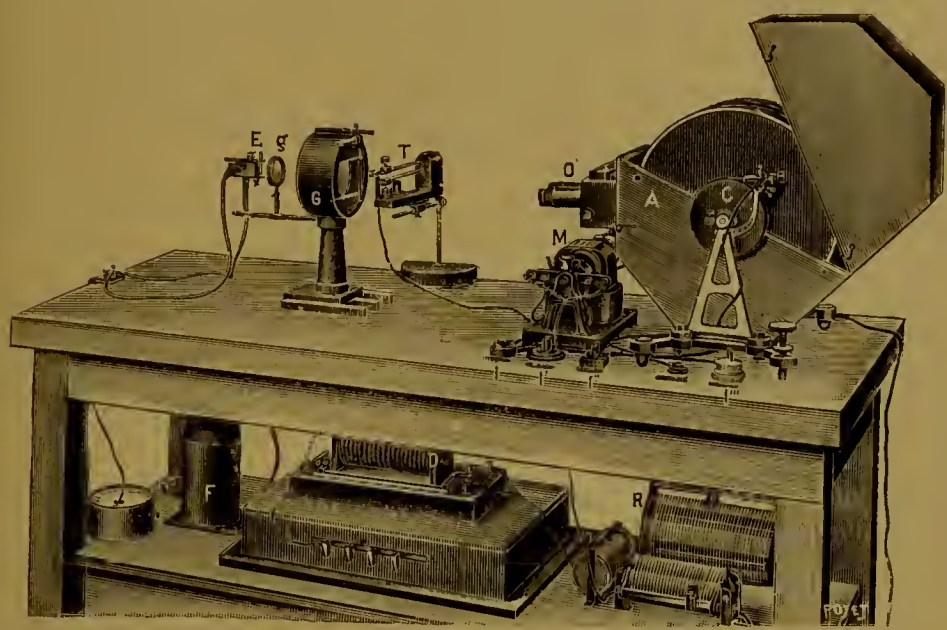


Fig. 92. — A, Boîte du chronophotographe. — C, Interrupteur rotatif — O, Objectifs. — D. Bobine d'induction. — F. Bouteille de Leyde. — R. Résistances. — M. Moteur électrique. — G et *g*, Grande et petite lentille condensatrices. — E, Porte-étincelles. — T, Diapason. — I, I′, I″, I‴, Coupe-circuits.

horizontal. Sur ce même axe, mais extérieurement à la boîte, est monté un interrupteur rotatif destiné à rompre un certain nombre de fois pendant un tour le circuit primaire d'une bobine d'induction D. Sur le trajet du courant induit est placé, en dérivation, un condensateur F, et les étincelles éclatent en E entre deux électrodes en magnésium derrière la lentille G; celle-ci concentre les rayons dans l'objectif O au foyer duquel tourne le cylindre. Ce cylindre est entouré d'une pellicule sensible et est animé d'un mouvement de rotation rapide. A chaque tour jaillit en E un nombre d'étin-

1. Bull (L.) : L'application de l'étincelle électrique à la chronophotographie des mouvements rapides. *C. R. Acad. Sc.*, 1904.

celles correspondant à celui des contacts sur l'interrupteur; il suffit alors de démasquer l'objectif pendant la durée d'un tour pour obtenir une série d'images régulièrement espacées d'un objet placé entre la lentille G et l'objectif. A cet effet est disposé derrière ce dernier un obturateur à double volet qui, au moment voulu, est ouvert par le passage d'un taquet dont est muni le bord du cylindre; la fermeture s'effectue automatiquement au tour suivant au moyen du même taquet. »

Avec cet appareil dont la vue d'ensemble est donnée par la figure 92 on a pu obtenir jusqu'à 1.500 images par seconde. M. Bull a photographié les mouvements de divers êtres inférieurs ou des phénomènes physiques. La figure 91 (pl. V) montre quelques exemples.

38. — Les projections animées. — A l'aide des appareils décrits plus haut, nous pouvons analyser les mouvements dont les vitesses sont comprises entre des limites assez grandes.

La synthèse de ces mouvements par la projection animée peut compléter nos connaissances sur leur nature si on se place dans certaines conditions.

Quand nous faisons la projection animée avec la même rapidité que dans la prise des images, on a la reproduction exacte du mouvement. Mais cette vue cinématographique ne peut nous donner d'autres renseignements sur la nature de ce mouvement que ceux fournis par l'observation directe du mobile.

Pour que la projection animée soit réellement instructive, il faut remplir les conditions indiquées par M. Marey[1], à savoir, de ramener le mouvement à des vitesses telles que notre œil puisse les suivre facilement. Si l'on fait passer sous les yeux de l'observateur une série d'images avec une vitesse suffisante (12-15 par seconde), on peut avoir une notion complète du mouvement, quelle que soit sa rapidité. Seulement, par cette projection animée, nous avons la possibilité d'accélérer les mouvements lents (ceux pour lesquels les images ont été prises à des intervalles de temps très grands : 1 seconde, 1 minute, 1 heure, etc.), et de ralentir les mouvements rapides (ceux pour lesquels il a fallu 100, 1.000, etc., images par seconde). On donne ainsi la sensation d'un mouvement

1. Marey : Nouveaux développements de la chronophotographie. *Revue des Travaux scientif.*, 1897.

parfaitement défini, qui montre toutes les phases d'un phénomène de longue ou de courte durée.

Nous avons pu faire la projection animée des images chronophotographiques représentées par les figures .

Les appareils d'étude dont il est question dans ce rapport ont été construits dans l'atelier de l'institut par MM. Farineau et Kelsen, mécaniciens. Je suis heureux de les remercier à cette occasion pour le concours précieux qu'ils ont prêté à l'exécution de ces travaux.

CONCLUSIONS

I

1. Dans toute inscription par un levier amplificateur, il y a lieu de réduire le moment d'inertie de ce levier au minimum tout en lui conservant une assez grande solidité.

2. L'amplification maxima, que l'on peut donner à ce levier, doit être déterminée d'après la vitesse du mouvement et d'après le degré d'élasticité du corps qui communique le mouvement au levier.

II

3. Les sphygmographes à ressort peuvent donner des indications assez exactes sur la forme du pouls si les conditions suivantes sont réalisées :

a) L'élasticité du ressort doit être aussi parfaite que possible; la force élastique ne doit pas dépasser 100 grammes par millimètre de flexion.

b) Le levier enregistreur ne doit pas avoir une amplification plus grande que 20.

c) La liaison entre le ressort et le levier doit être des plus intimes. Les galets offrent d'assez grands avantages si leur construction est parfaite; la bielle serait à préférer.

III

4. Pour que la transmission par l'air puisse être employée à l'étude des mouvements physiologiques, il faut réaliser certaines

conditions indispensables concernant les parties composantes de tout système à transmission par l'air, à savoir l'appareil inscripteur, le tube de transmission et l'appareil explorateur.

5. Parmi les appareils inscripteurs à transmission par l'air le tambour à levier donne les meilleures indications. Les éléments constitutifs de cet appareil demandent un réglage spécial :

a) La membrane doit avoir une élasticité aussi parfaite que possible, et sa période propre doit être d'autant plus courte que le mouvement qu'elle reçoit est plus rapide. Quand cette membrane est en caoutchouc, on arrive à ce résultat en lui donnant une tension en rapport avec la surface du tambour et la rapidité du mouvement.

b) Le disque ne doit pas immobiliser une trop grande surface de cette membrane, et pour cela il est préférable que le diamètre du disque ne dépasse pas $\frac{1}{5}$ de celui du tambour.

c) Les articulations du levier doivent être des plus justes afin qu'il n'y ait ni jeu ni frottement nuisibles.

6. Les tubes de transmission doivent avoir au moins 5 millimètres de diamètre intérieur. On a tout avantage à prendre des tubes ayant 5 à 10 millimètres de diamètre intérieur et de placer sur leur trajet un diaphragme percé en mince paroi. Le diamètre de cet orifice doit être $\frac{1}{50}$ environ de celui du tambour.

7. Les appareils explorateurs à air doivent être pourvus d'une membrane dont la force élastique soit supérieure à celle du tambour à levier. Tout ressort tenseur doit être placé à l'extérieur. Quand sur la membrane de l'explorateur se trouve collé un disque, celui-ci doit avoir le plus grand diamètre possible.

IV

8. Vu les développements que la chronophotographie a pris, il y a lieu de la préférer à la chronostylographie dans tous les cas où cela peut se faire.

TRAVAUX DU LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE

DE L'UNIVERSITÉ DE LONDRES

GALVANOMÉTRIE ET GALVANOGRAPHIE

Rapport présenté à l'Association de l'Institut Marey

(Séance du 31 août 1904)

Par **A.-D. WALLER**

DIRECTEUR DU LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ DE LONDRES

Le circuit normal. — Galvanomètres. — Bobine, compensateur, électrodes et clavier. — Inscription photographique. — Électromètre capillaire de Lippmann. — Clefs spéciales. — Unités de résistance et de conductance.

Dans un laboratoire de physiologie, le galvanomètre peut être employé soit pour des recherches spéciales d'électrophysiologie, soit au cours d'une recherche où l'électrophysiologie ne joue qu'un rôle secondaire et où le galvanomètre sert de balance pour indiquer les différences de potentiel entre deux points quelconques.

Les remarques suivantes sont faites plutôt à l'égard de ce second cas. On peut envisager le galvanomètre soit comme un manomètre mesurant les pressions électriques d'une façon analogue à la mesure de la pression du sang, soit comme balance chimique, au moyen de laquelle on peut comparer numériquement les valeurs énergétiques des phénomènes physiologiques capables d'une expression électrique. Dans beaucoup de cas il sera nécessaire, ou très avantageux, d'employer la méthode graphique.

Les appareils nécessaires se composent : (I) d'un galvanomètre ; (II) d'un compensateur ; à ces deux, différents accessoires doivent

être ajoutés : (III) l'appareil d'excitation; (IV) des électrodes; et (V) le clavier, au moyen duquel les pièces constituantes de l'appareil seront jointes pour former ce que nous pouvons désigner sous le nom de circuit normal. (L'arrangement pour prendre des inscriptions photographiques est un autre accessoire décrit plus bas, page 6.)

Le Galvanomètre. — Pour les usages ordinaires et surtout quand il s'agit d'observer des phénomènes lents, ou de se servir du galvanomètre comme indicateur de compensation, peu importe le type de l'instrument, pourvu que sa sensibilité puisse être facilement déterminée et réglée.

Pour les phénomènes rapides et surtout quand il s'agit de leur inscription photographique, le galvanomètre d'Einthoven est préférable à tout autre instrument (voir plus loin), y compris l'électromètre capillaire de Lippmann.

Le galvanomètre d'Einthoven (Saitengalvanometer) se compose d'un fil de quartz, argenté, tendu entre deux bornes, dans un champ électromagnétique très puissant (25.000 unités C.G.S., et même davantage). Un courant très faible, de 1×10^{-10} ampère (et au-dessous) fait dévier ce fil; il tend à s'échapper du champ magnétique en se mouvant normalement aux lignes de forces parcourant ce champ. La déviation est plus ou moins considérable suivant la tension du fil; celle-ci est variable au moyen d'une vis micrométrique avec indicateur et cadran. Les mouvements du fil sont amplifiés (multiplication de 6 à 700 diamètres) par un microscope à projection. On obtient sur l'écran un disque lumineux traversé par une ligne noire qui est l'image du fil se mouvant soit sur une échelle horizontale, soit sur une fente horizontale (dans une chambre noire) derrière laquelle se meut une plaque photographique, au cas où l'on désire faire un enregistrement.

Un deuxième microscope sert à condenser la lumière sur le fil : les objectifs des deux microscopes traversent les deux électro-aimants.

L'équipage, c'est-à-dire la partie mouvante du galvanomètre, se trouve donc réduit au fil seul; sa longueur est de 15 centimètres, et son poids de $\frac{1}{1.000}$ de milligramme. La rapidité et

l'amortissement sont, sinon parfaits, fort supérieurs à ceux de l'électromètre. La sensibilité de l'instrument est telle que l'indication galvanométrique peut atteindre la valeur de 1×10^{-12} ampère.

Le galvanomètre ordinaire doit être d'une sensibilité telle que 0,001 volt à travers un Megohm donne une déviation de 10 centimètres à une distance de 2 mètres. Ainsi, une déviation de 1 centimètre correspond, dans un tel circuit, à un courant de 1^{-10} ampère.

Il est toujours bon de fixer un galvanomètre une fois pour toutes en une place spéciale et déterminée. La meilleure position pour l'instrument et où il serait prêt à être employé, à un moment donné, est dans une niche ou petite armoire construite dans l'épaisseur d'un mur solide et ferme. Sinon, une planche solide fixée au mur et ne touchant pas le plancher de la chambre est suffisante à tous les besoins ordinaires du laboratoire.

Que l'instrument soit employé pour des démonstrations ou qu'il le soit pour des mesures proprement dites, l'observation des déviations par le moyen d'une méthode objective doit toujours être employée de préférence à l'observation télescopique.

Il suffit de projeter l'image d'un trait de lumière, soit sur une échelle transparente et graduée, soit sur une plaque photographique.

La lumière la plus commode dans ces deux cas est l'image du filament d'une lampe incandescente. Quand des inscriptions photographiques sont nécessaires, il est très désirable, voire indispensable, de travailler avec deux galvanomètres en série, l'un pour l'observation, l'autre servant d'appareil enregistreur.

Calibrage du galvanomètre et choix d'une échelle convenable. — Les déviations d'un même galvanomètre n'ont pas toujours une valeur constante, vu que la résistance du circuit varie d'après la résistance de l'objet en observation et des électrodes impolarisables.

Le moyen le plus expéditif pour graduer un galvanomètre est d'observer (ou de photographier) la déviation de la mouche lumineuse quand un courant de voltage connu du compensateur passe dans le circuit (dont la résistance doit être connue). Il est bon d'employer un Megohm de carbone pour la graduation (voir plus loin, p. 13).

Dans les cas où une altération de résistance a lieu dans le cours de l'expérience, il est nécessaire de prendre la valeur du voltage-étalon, avant et après l'expérience[1].

Le compensateur, donne le moyen (1) de nous procurer un voltage-étalon, et (2) de pouvoir compenser et par là mesurer les courants dérivés de l'objet en observation. Le courant de compensation nous donne encore la possibilité de vérifier l'intégrité du circuit général et du galvanomètre.

Dans sa forme la plus simple et suffisamment exacte pour nos besoins ordinaires, l'arrangement compensateur consiste d'une pile Leclanché jointe à deux boîtes de résistance qui sont le numérateur et le dénominateur de toute fraction voulue d'un volt.

Prenant le voltage de la pile comme 1,4, et la résistance (R) du dénominateur comme 14.000 ohms, la résistance (r) du numérateur, calculée en ohms, donnera alors, aux électrodes, un voltage en dix-millièmes — ainsi, si $r = 10$ ohms, le voltage obtenu $= 0{,}001$; si $r = 100$, voltage $= 0{,}01$[2].

Dans les expériences proprement dites, il est bon d'avoir un compensateur-étalon qui puisse donner des valeurs de 0,01, 0,001 0,0001, indépendamment du compensateur général.

La comparaison entre les déviations expérimentales et la déviation-étalon d'un voltage extérieur connu n'est pas faite pour donner la valeur absolue de la force électromotrice intérieure d'un tissu actif.

Le circuit extérieur et le galvanomètre ne reçoivent qu'une fraction de la différence électromotrice intérieure totale, qui produit un courant en partie à travers les tissus conducteurs internes, et en partie à travers l'arc extérieur (galvanométrique). Bien plus, les relations de temps de l'action physiologique sont

1. Dans les premières expériences préliminaires, les déviations obtenues seront probablement trop grandes pour pouvoir être gardées dans les limites de l'échelle. Le meilleur moyen d'obtenir une déviation lisible est de *shunter* le galvanomètre, ne faisant ainsi passer qu'une fraction convenable du courant total à travers l'instrument.

2. Ce ne sont, certes, que des résultats approximatifs, puisque le voltage d'un Leclanché n'est jamais exactement 1,4 volt, et que la fraction du voltage pris n'est pas $\frac{r}{R}$ mais $\frac{r}{R+r}$. Outre cela, la résistance intérieure de la pile n'est pas en ligne de compte. La méthode, néanmoins, est suffisamment juste, l'erreur principale étant constante et l'erreur variable une quantité négligeable.

généralement telles que des effets internes de courte durée produisent de petits effets externes qui ne peuvent pas devenir constants par un voltage extérieur prolongé.

Ainsi une impulsion nerveuse d'une durée de 0,005 seconde, par exemple, pourrait produire sur un instrument donné la même déviation qu'un courant constant d'une force électromotrice de 0,001 volt; mais ceci n'indiquerait pas la valeur électromotrice de l'impulsion nerveuse. On pourrait arriver à une approximation plus rapprochée en faisant la comparaison avec un voltage effectif extérieur de 0,005 seconde seulement; de cette façon, Gotch et Burch assignèrent 0,03 volt comme étant la valeur électromotrice d'une impulsion nerveuse unique. Et ce n'est pas encore la vraie valeur, à cause de la dérivation interne mentionnée plus haut.

L'objet principal d'un voltage-étalon au commencement et à la fin d'une expérience est (1) d'indiquer que la résistance a été ou n'a pas été altérée durant l'expérience; et (2) d'indiquer la sensibilité des instruments employés. En lui même, il ne contient pas de données satisfaisantes pour une comparaison entre les valeurs électromotrices de la réponse dans différents tissus, et ce n'est que sous réserves (c'est-à-dire après contrôle de la résistance altérée et de la durée altérée d'action) qu'il peut être utilisé pour la recherche et l'estimation des valeurs électromotrices altérées durant toute observation.

Avec ces réserves devant nous, nous pouvons, néanmoins, parler du « voltage » d'un courant d'altération comme étant « mesuré » par celui d'un courant de compensation, et indiquer en nous référant aux déviations-étalon l'échelle du voltage dans laquelle les *blazes* sont extérieurement manifestés.

L'excitateur. — Dans la majorité des cas, l'appareil à chariot de Du Bois Reymond est employé (modèle de Berne gradué en progression arithmétique).

Dans les expériences où il est nécessaire d'estimer la quantité, ou l'énergie de la décharge, on emploie alors un condensateur. Dans tous les cas, deux méthodes d'excitation sont applicables : (1) l'excitation passant à travers l'objet et le galvanomètre en série, (2) le galvanomètre étant « court-circuité » durant l'excitation, et mis en circuit après un court intervalle.

Electrodes. — Il est absolument essentiel que les électrodes

soient impolarisables. La combinaison de Du Bois Reymond (zinc et sulfate de zinc) a donné, à mon avis, de bien meilleures électrodes que celles introduites récemment — comme par exemple l'argent et le chlorure d'argent, ou le mercure et le calomel.

Clavier. — Dans l'emploi constant d'un galvanomètre comme instrument de mesure, le circuit devrait être arrangé de façon que la direction des courants d'excitation et de réaction puissent être rapidement déterminés.

Le moyen le plus simple pour obtenir cet arrangement est d'avoir un clavier à plusieurs paires de bornes, auxquelles seront attachées les différentes parties de l'appareil, formant ainsi ce que nous avons déjà appelé le circuit normal. Chaque pièce particulière de l'appareil est contrôlée par une cheville métallique bouchant ou débouchant l'espace entre les deux bornes auxquelles chaque paire de fils est attachée. Deux commutateurs, l'un dans le circuit d'excitation, l'autre dans le circuit de compensation, permettent d'envoyer le courant dans la direction voulue. Une clef ordinaire interrompt le circuit principal du compensateur[1].

Inscription photographique. — Il est possible, en cas de besoin, de photographier et d'observer à la fois. A cet effet, l'échelle transparente doit être remplacée par un écran vertical opaque, avec une fente horizontale, derrière laquelle une plaque photographique tombe, mue par un mouvement d'horlogerie.

L'emploi de deux galvanomètres en série simplifie l'étude à un tel degré, qu'il est préférable d'employer un second instrument pour les records graphiques. L'un des galvanomètres se trouve dans le laboratoire avec son échelle transparente devant l'observateur, tandis que le second est à une certaine distance dans une chambre noire.

Le premier indique et le second inscrit les courants en observation.

1. Les choses sont de beaucoup simplifiées avec un arrangement du circuit disposé de façon qu'un courant positif ou négatif puisse donner les directions conventionnelles, c'est-à-dire positif vers la droite et négatif vers la gauche. La meilleure façon de déterminer la direction d'un courant est de toucher l'une des bornes avec une barre de métal (comme le zinc) tenue par une main, tandis qu'un doigt de l'autre main fait contact avec la seconde borne. La borne touchée par le zinc « tire » à travers le galvanomètre, et si la déviation précédente a été dans la même direction ou dans la direction opposée, nous savons que le point en contact avec la même borne a été alors zincatif ou contre-zincatif, c'est-à-dire électropositif ou électronégatif.

La graduation du galvanomètre enregistreur doit être faite sur une échelle moindre que celle du galvanomètre indicateur. Une relation avantageuse entre les deux échelles est de 1 à 10, c'est-à-dire que chaque déviation d'un centimètre du galvanomètre indicateur est représentée par un millimètre sur l'enregistreur. La relation est ajustée, en cas de nécessité, en shuntant l'un des galvanomètres, et, une fois établie, nous pouvons alors shunter les deux galvanomètres de façon à réduire les deux déviations dans la même proportion. Pour cette réduction, le shunt ordinaire doit être joint avec les bornes de chaque côté de la cheville n° 1. L'arrangement le plus pratique de deux galvanomètres est indiqué dans la figure 4 dans laquelle G_1 est l'indicateur et G_2 l'enregistreur. Les deux galvanomètres sont contrôlés simultanément par cheville n° 1, séparément et individuellement par chevilles n°s 5 et 6 d'un clavier secondaire. Nous sommes ainsi capables d'ajuster la compensation et de faire tout ajustement préliminaire ayant le galvanomètre photographique en court-circuit, en 6, et par conséquent, n'étant pas dérangé par les manipulations dans le restant du circuit, où nous sommes guidés par le galvanomètre indicateur. Pour une observation d'une durée quelconque, les deux galvanomètres sont en circuit et simultanément contrôlés par cheville n° 1, et la marche générale de l'inscription sur G_2 dans la chambre noire, peut être suivie sur l'échelle de G_1 placée sur la table d'expériences.

L'appareil accessoire contenant la plaque sensible consiste en une boîte de 50 centimètres de hauteur qui porte l'échelle et la fente horizontale, d'une épaisseur d'un demi-millimètre sur sa surface antérieure. La plaque, dans un châssis photographique suspendu par un fil sur une roue mise en mouvement par un mouvement d'horlogerie, descend verticalement.

Les déviations de la mouche galvanométrique sont enregistrées latéralement sur la ligne de la fente horizontale. Une sonnerie électrique nous prévient du moment où la plaque est à la fin de sa descente. Un chronographe et un signal Despretz pour marquer le début et la fin de chaque excitation peuvent être facilement ajoutés.

Vitesse d'enregistrement. — Vu l'inertie des aimants et du miroir suspendus du galvanomètre, nous devons nous contenter de

phénomènes inscrits qui sont prolongés ou répétés à des intervalles réguliers. La méthode n'est pas adaptée pour inscrire les phénomènes qui exigent une vitesse de surface enregistrante supérieure à 5 millimètres par seconde. Elle est bien mieux adaptée aux phénomènes de longue durée, ou aux réactions qui sont répétées à des intervalles réguliers. Dans cette classe d'observations, une vitesse de 2 1/2 à 5 millimètres par minute est ordinairement suffisante. Le « temps perdu » de la réaction neuro-cutanée est un exemple d'un phénomène bon à être enregistré galvanométriquement.

Il est pratique d'adopter une grandeur fixe de la plaque photographique; le 9 × 12 qui se trouve dans l'industrie répond à tous les emplois ordinaires. Ces dimensions nous donnent la possibilité d'enregistrer une série de déviations avec une amplitude variant de 1 à 5 centimètres et une longueur d'au moins 10 centimètres. Ces 2 1/2 et 5 millimètres donnent des records durant 40 et 20 minutes; 5 millimètres par seconde donne un record de 20 secondes. Pour des vitesses au delà de 5 millimètres par seconde, il est nécessaire d'employer, soit un électromètre enregistreur, soit le galvanomètre d'Einthoven.

Inscriptions simultanées. — Dans certains cas, il est désirable d'obtenir l'inscription simultanée d'une série de réactions électriques et d'une série correspondante de contractions musculaires.

A cet effet, on ajoute à l'appareil un chariot portant une plaque enfumée et qui est joint au châssis suspendu contenant la plaque photographique. Le fil, par lequel le châssis est suspendu, passe autour de l'axe du moteur et sur deux petites poulies fixées à la planche portant la plaque enfumée, qui se meut alors dans une direction horizontale, correspondant à la descente verticale de la plaque sensible. De cette façon, une inscription simultanée peut être obtenue, d'une série de contractions musculaires, par exemple, ensemble avec les variations négatives du courant musculaire; ou encore de la contraction et de la chaleur (au moyen d'un thermo-galvanomètre), ou enfin des contractions du muscle et de la variation négative de son nerf, etc., etc.

Dans le laboratoire de physiologie de l'Université de Londres, les appareils décrits plus haut sont disposés de façon à former

deux tables d'expériences avec deux paires de galvanomètres et appareils accessoires.

Les galvanomètres G_1 à G_5 sont placés sur des supports d'un côté du laboratoire, comme la figure l'indique. (Le galvanomètre G_3 est un instrument séparé de faible résistance, pour être employé par l'une ou l'autre table, et qui donne des données thermo-électriques de température : il fonctionne par le moyen d'un fil Constantan et d'un fil de fer, dont le changement de force électro-motrice est balancé par compensation ; le compensateur est gradué de telle façon qu'une longueur donnée a une valeur thermométrique donnée.)

Chaque paire de galvanomètres, G_1 et G_2, G_4 et G_5, est supposée être employée d'après la description donnée plus haut; pour des travaux ordinaires, le galvanomètre indicateur G_2 ou G_4 seulement, est employé; quand un phénomène demandant un enregistrement se présente, le galvanomètre enregistreur G_1 ou G_5 est mis en jeu.

De telle façon, l'appareil est employé dans un laboratoire sans éprouver aucun dérangement par toute autre expérience prenant place dans la même chambre.

L'ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE DE LIPPMANN, comme le galvanomètre, peut être employé (1) comme un instrument délicat de recherches pour le but spécial d'électrophysiologie, cas où ses indications photographiées doivent être mathématiquement analysées; ou (2) comme un instrument ordinaire de laboratoire pour l'inspection sommaire et la démonstration convenable de changements électriques trop courts ou se succédant trop rapidement pour pouvoir être lus sur le galvanomètre, comme, par exemple, les changements électriques accompagnant le battement du cœur. Au moyen d'un appareil d'enregistrement très simple, la valeur de l'électromètre comme instrument ordinaire d'inspection et de démonstration est largement augmentée. Dans le laboratoire, un électromètre capillaire est employé le plus souvent en place d'un galvanomètre. L'image du capillaire (dans le microscope de projection), avec un objectif $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{10}$, est d'abord projetée sur un écran transparent, où les mouvements de la colonne mercurielle sont indiqués. Un écran opaque, avec une fente verticale derrière

laquelle une plaque photographique verticale voyage horizontalement, est alors placé sur la table d'expérience de façon à recevoir l'image de la colonne mobile du mercure, qui est ainsi photographiée. Et enfin, la photographie développée est placée dans la lanterne ordinaire de projection.

Il n'y a, de cette façon, aucune difficulté de démontrer, au cours d'un quart d'heure : 1° les indications électroscopiques d'un cœur de grenouille, par exemple; 2° les records photographiés de telles indications.

Le diamètre d'une colonne capillaire de mercure est d'environ 25 μ.

Sur l'écran, à une distance de 3 à 4 mètres, le grossissement de l'image donnée par l'objectif $\frac{1''}{10}$ est d'environ 1.000 à 1.500 diamètres, c'est-à-dire que la colonne a un diamètre apparent de 25 à $37^{mm},5$. Sur la plaque photographique, à une distance de $0^{m},6$ le diamètre apparent est de plus de 6 millimètres, c'est-à-dire plus qu'il n'est nécessaire pour couvrir la fente verticale, dont la largeur est moins d'un quart de millimètre. Pour un cœur de grenouille, un agrandissement moindre est suffisant. Pour le cœur humain, le plus grand agrandissement possible doit être employé.

Le principe par lequel les valeurs électrométriques sont obtenues de telles inscriptions électroscopiques est illustré suffisamment par la démonstration des excursions du tracé causé par différents voltages agissant pendant des durées égales et par un voltage donné agissant pendant des durées différentes.

Le voltage indiqué par toute courbe donnée ou par toute portion de courbe est le plus facilement connu en superposant le tracé sur celui d'une « courbe normale », c'est-à-dire d'une courbe décrite par une différence constante de potentiel prise dans les mêmes conditions. Les deux plaques sont superposées, et les abscisses tenues parallèles jusqu'à ce que des portions de la courbe en observation coïncident avec la courbe normale de voltage connu. De telles portions sont équipotentielles, de façon que la valeur de la courbe normale donne la valeur de la courbe qu'on a sous les yeux[1].

1. Pour une analyse plus détaillée des courbes électrométriques, consulter les monographies de Burch, Einthoven et Garten. Dans plusieurs cas, la courbe calculée

Unités de résistance et de conductance. — Les unités de résistance sont l'ohm et le megohm (=1.000.000 d'ohms). Les unités correspondantes de conductance sont le mho et le gemmho qui sont les réciproques de l'ohm et du megohm.

Une substance ayant une résistance de 1 megohm (Ω) a une conductivité de 1 megohm ou un γ.

$$1\,\gamma = \frac{1}{\Omega}.$$

Dans une expérience sur les *blazes* de la peau humaine, 5 heures après amputation, les conductivités suivantes furent notées :

	DÉVIATION par 0,01 volt	RÉSISTANCE — 20.000 ohms	CONDUCTANCE
Au commencement.	5	520.000 ohms	1,92 γ
Après la 1re tétanisation	12,5	196.000 —	5,67 γ
— 2e —	25	88.000 —	11,35 γ
— 3e —	35	57.143 —	17,50 γ
— l'avoir bouillie	115	3.478 —	288,90 γ
Déviation-étalon à travers 1 megohm, ou 1 γ	2,7	1.000.000 ohms	1,00 γ

D'où il est évident, que là où la résistance de l'objet que l'on examine est grande comparée à la résistance du galvanomètre et des électrodes (20.000 ohms dans ce cas), nous pouvons regarder les altérations de la déviation comme indiquant les altérations de la conductance. Tandis que, si la résistance de l'objet est relativement petite, nous devons calculer la conductance après avoir retranché de la résistance totale en circuit la résistance du galvanomètre et des électrodes.

Pour beaucoup de cas — pour comparer, par exemple, la résistance (ou la conductance) de différents objets — il sera évidemment nécessaire de réduire nos résultats à une dénomination commune, c'est-à-dire à la résistance (ou à la conductance) d'un cube d'un centimètre. Ainsi, une tige de 10 centimètres de

semble être complètement différente du tracé original obtenu d'après les mouvements de la colonne mercurielle.

longueur avec une surface de section de 10 millimètres carrés, ayant une résistance de 200.000 ohms (= une conductance de 5 γ) a une résistivité $= \frac{200.000}{10 \times 10}$ et une conductivité $= 5 \times 10 \times 10$. La réduction au cube d'un centimètre est en conformité avec la pratique de la chimie physique moderne. La conductivité de 1 megohm, ou 1 $\gamma = 1 \times 10^{-15}$ unités C. G. S; celle de 1 ohm, ou 10^6 γ, étant 1×10^{-9}.

Les électrolytes, en général, augmentent de conductivité avec l'augmentation de température, le coefficient de l'augmentation étant approximativement de 2 p. 100 par degré.

	RÉSISTIVITÉ (en ohms)	CONDUCTIVITÉ (en megohms réciproques)
Mercure	0,000.094	10.630.000.000
Acide sulfurique, 30 0/0 à 40° . . .	1	1.000 000
Chlorure de sodium :		
Solution saturée, à 18°, 26,4 °/₀ .	4,627	216.100
— molécul., à 18°, 5,62 °/₀ .	13,45	74.400
— $\frac{m}{10}$, à 18°, à 0,58 °/₀ . .	108	9.250
Eau de mer, à 15°	20	50 000
Plantes marines	80	12.500
Urine	50	20.000
Sérum du sang	125	8.000
Sang défibriné	250	4.000
Muscle et nerf (longitudinalement).	200	5.000
Jus de raisin	500	2.000
Végétaux et fruits.	2.000	500
Eau ordinaire.	2.500	400
Eau distillée ordinaire	100.000	10
Bonne eau distillée	1.000.000	1
Eau distillée de Kohlrausch	25.000.000	0,04

Les mesures de résistance (et de conductance) sont prises au moyen d'un pont de Wheatstone, avec la méthode de Kohlrausch; mais pour beaucoup de cas où la polarisation des électrodes et du tissu peuvent être négligés, il est convenable et suffisant d'estimer la conductance directement de la déviation galvanométrique.

Dans le cas des plantes, la résistance est généralement si

grande, qu'il est permis de négliger celle du galvanomètre et des électrodes, et d'exprimer, d'un coup, les déviations en termes de conductance. Un megohm de carbone (= 1.000.000 ohms) attaché à un clavier est un étalon suffisant, donnant, d'un coup, sur l'échelle ou sur la photographie, la valeur de notre unité de conductance, 1 γ.

La correction pour la résistance du galvanomètre et des électrodes doit être faite, si demandée, comme suit :

Soient r_1 et d_1 la résistance du galvanomètre + le megohm, et la déviation d'un certain voltage donné. r_2 et d_2 la résistance du galvanomètre + les électrodes et la déviation du même voltage — pratiquement nous devons prendre $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ du voltage et multiplier par 10 ou 100. r_3 et d_3 la résistance du galvanomètre + les électrodes + l'objet de l'expérience, et la déviation par le même voltage.

La résistance demandée r_4, de l'objet examiné $= r_3 - r_2$, et puisque

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{d_2}{d_1}, \text{ et } \frac{r_1}{r_3} = \frac{d_3}{d_1}, \quad r_2 = \frac{r_1 d_2}{d_2}, \text{ et } r_3 = \frac{r_1 d_1}{d_3},$$

la résistance demandée

$$r_4 = \frac{r_1 d_1}{d_3} - \frac{r_1 d_1}{d_2} = \frac{r_1 d_1 (d_2 - d_1)}{d_2 d_3}$$

et la conductance correspondante

$$\frac{d_2 d_3}{r_1 d_1 (d_2 - d_1)}.$$

Si la résistance du galvanomètre est connue, il n'est pas alors nécessaire d'avoir un megohm dans le circuit.

La méthode de Kohlrausch est employée dans le laboratoire de Physiologie pour l'essai rapide de l'eau distillée, des solutions salines diluées, et du sang, du sérum, de l'urine, etc.

Les électrodes (de platine platinisé) sont ajustées à une « capacité de résistance » convenable (environ $\frac{1}{10}$ pour l'eau, 1 pour du salin dilué, sérum et sang, 10 pour des solutions de plus grande conductivité) de façon que la résistance sous observation tombe

entre les limites de 100 et de 1.000 ohms. Les électrodes formant l'x du pont de Wheatstone sont plongées dans le fluide sous observation; un téléphone est joint au pont en place du galvanomètre; les courants d'essai dérivent d'une petite bobine d'induction, et le point de silence est recherché par le changement de la résistance variable. Les calculs de la résistance sont ainsi facilement obtenus avec une erreur de $\pm$ 1 p. 100, à la température de 18 degrés. Une correction de $\pm$ 2 p. 100 du calcul est à faire pour chaque $\pm$ 1 degré.

$$\text{Conductivité spécifique} = \frac{\text{Capacité de résistance}}{\text{Résistance observée}}.$$

La capacité de résistance d'une paire donnée d'électrodes dans un vase donné est déterminée par la mesure de la résistance à travers une solution-étalon d'une conductivité connue. Ainsi une paire d'électrodes dans une solution décinormale de ClK à 18 degrés a une résistance $= 200$ ohms. La capacité de résistance $= 200 \times 0{,}01119 = 2{,}238$ (*Résistance* $\times$ *Conductivité* $=$ *Capacité*).

Avec la même paire d'électrodes, la résistance d'un échantillon de sérum est de 320 ohms. Sa conductivité spécifique $= \frac{2.238}{320} = 0{,}006994$ mho ou 6.994 γ.

Les nombres nécessaires sont donnés dans les tables de Kohlrausch et Holborn, et desquelles nous pouvons tirer cette règle empirique importante : Pour de faibles solutions $\left(\frac{n}{10}\right.$ et au-dessous$\left.\right)$ la conductivité spécifique (en ohms) $\times$ 10 $=$ le nombre de gramme-équivalents par litre et — la conductivité spécifique $\times$ poids moléculaire $=$ le pourcentage du sel en solution.

Bibliographie.

Lippmann : Capillary Electrometer. *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences*, p. 1407, 1873.

Marey et Lippmann : Electrometer Records. *Comptes Rendus*, p. 278, 1876.

Burdon-Sanderson and Page : On the Electrical Phenomena of the Excitatory Process in the Heart of the Frog and of the Tortoise, as investigated photographically. *Journal of Physiology*, vol. IV, p. 327, 1883.

Burch : On the Time Relation of the Excursions of the Capillary Electrometer. *Phil.*

Trans. Roy. Soc., vol. CLXXXIII, p. 81, 1892; *Proc. Roy. Soc.*, vol. LX, p. 329, 1896.

Einthoven : Lippmann's Capillar-Electrometer zur Messung schnellwechselnder Potentialunterschiede. *Archives de Pflüger*, Bd. 56, p. 528, 1894; Bd. 60, p. 91, 1895; Bd. 79, p. 1, 1900.

Hermann : Das Capillar-Electrometer und die Actionsströme des Muskels. *Archives de Pflüger*, Bd. 63, p. 440, 1896.

Garten : Ueber ein einfaches Verfahren zur Ausmessung der Capillarelektrometer-Curven. *Archives de Pflüger*, Bd. 89, p. 613, 1902.

Kohlrausch und Holborn : *Leitvermögen der Elektrolyte*. Leipzig, 1898.

E. Cohen : *Vortrage für Aertzte über physikalische Chemie*, Leipzig, 1891.

Whetham : *Solution and Electrolysis*. Cambridge, 1895 (nouvelle édition, 1902).

R. Höber : *Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe*. Leipzig, 1902.

Einthoven : *Die galvanometrische Registrirung des menschlichen Eleklrocardiogramms*, etc. *Pflüger's Archiv*, Bd. 99, p. 472, 1903.

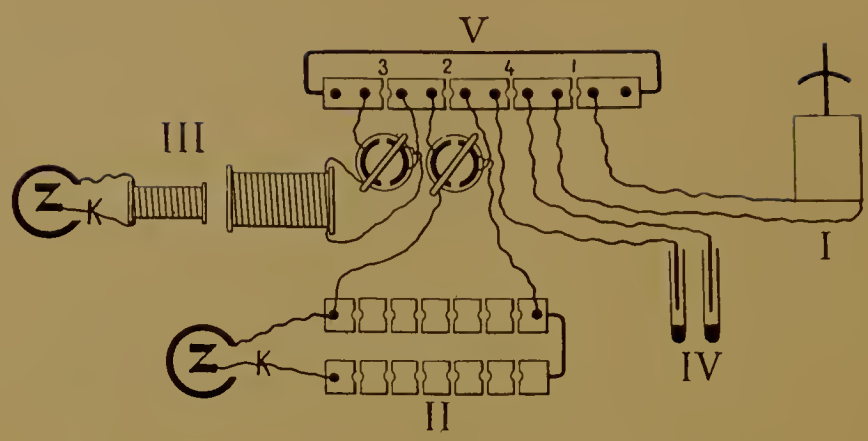


Fig. 1. — Circuit normal décrit dans le texte. (La bobine secondaire est figurée comme pour l'excitation directe d'un objet donné IV. Il va sans dire, que s'il fallait employer l'excitation indirecte, les fils sont détachés du clavier, et la cheville est replacée pour compléter le circuit du clavier.)

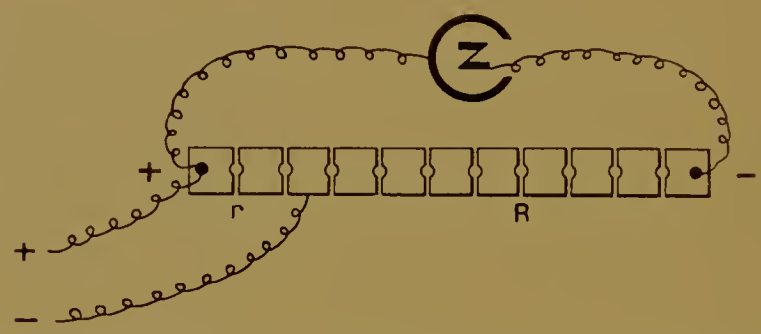


Fig. 2. — Illustrant le principe sur lequel est construit un compensateur; avec une pile d'un volt, R = 1.000 ohms et $r = 1$ ohm, la différence de potentiel aux extrémités + et — sera approximativement $\frac{1}{1.000}$ volt; la même différence de potentiel serait obtenue avec une pile de 1,4 volt et R = 1.400 ohms. La compensation est établie par la variation de R.

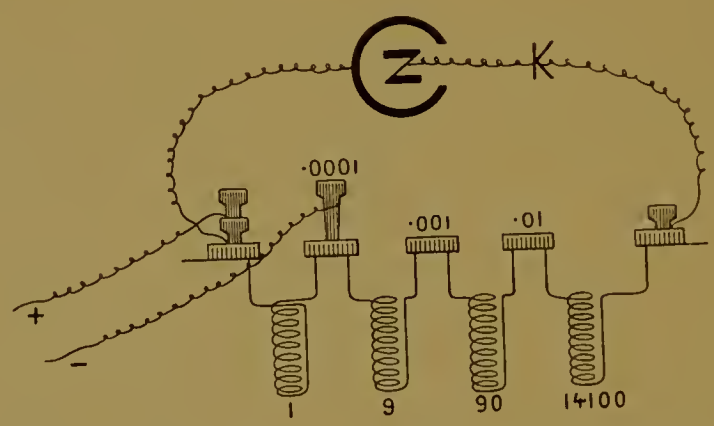


Fig. 3. — Compensateur délivrant $\frac{1}{10.000}$, $\frac{1}{1.000}$ ou $\frac{1}{100}$ d'un volt d'une pile Leclanché (de 1,42 volt).

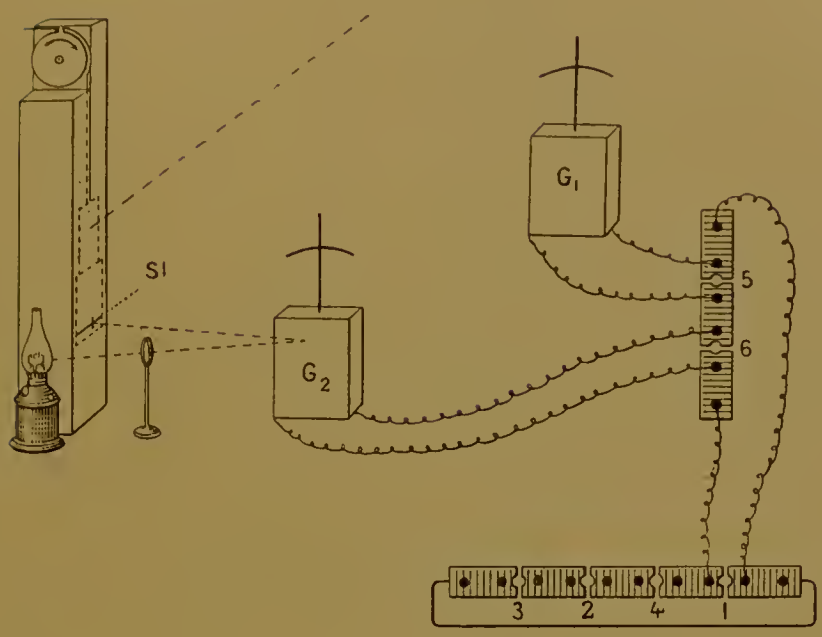


Fig. 4. — Galvanographe.

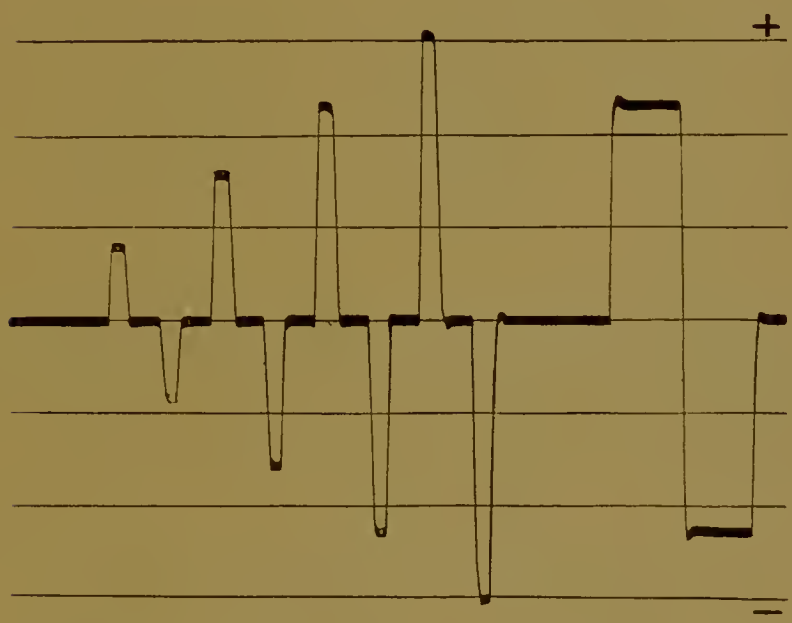


Fig. 5. — Record photographique des déviations galvanométriques dans les directions + et −, causées par des voltages (approximatifs) de 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04, et encore une fois 0,03 à travers un circuit d'approximativement 1 megohm (= 1.000.000 ohms).

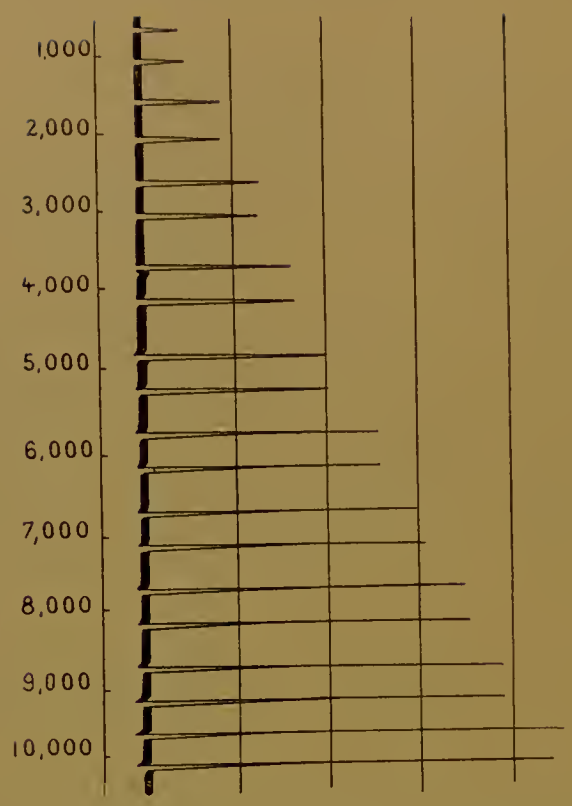


Fig. 6. — Record photographique des déviations causées par des chocs inductifs d'ouverture d'une bobine de Berne. Deux essais à chaque force.

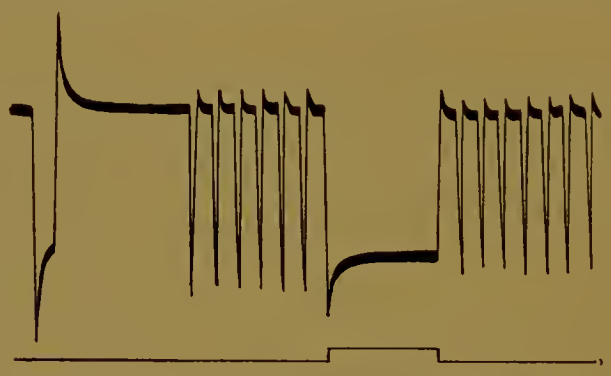


Fig. 7. — Réponse d'une plaque de cuivre, oxydée, illuminée pendant sept secondes à des intervalles d'une minute. Une illumination prolongée a été faite au milieu de la série, pour voir si un signe de fatigue était visible. (La première déviation par $\frac{1}{1.000}$ volt mise en circuit indique une polarisation ordinaire.)

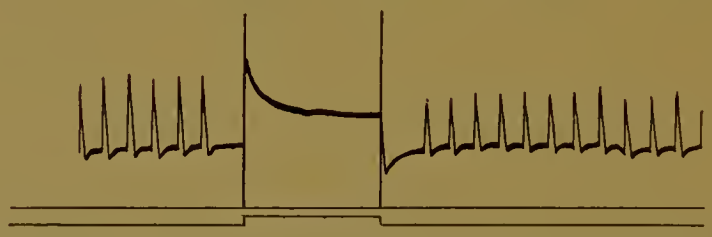


Fig. 8. — Observation identique sur une plaque recouverte de chlorure d'argent. Un changement bien marqué a lieu après une illumination prolongée.

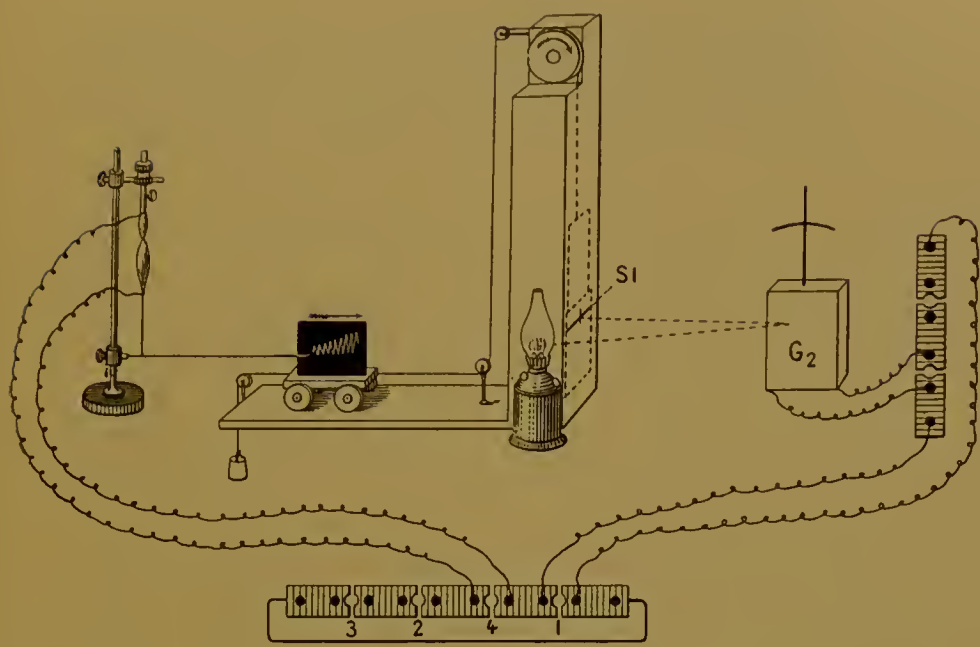


Fig. 9. — Galvanographe et Myographe.

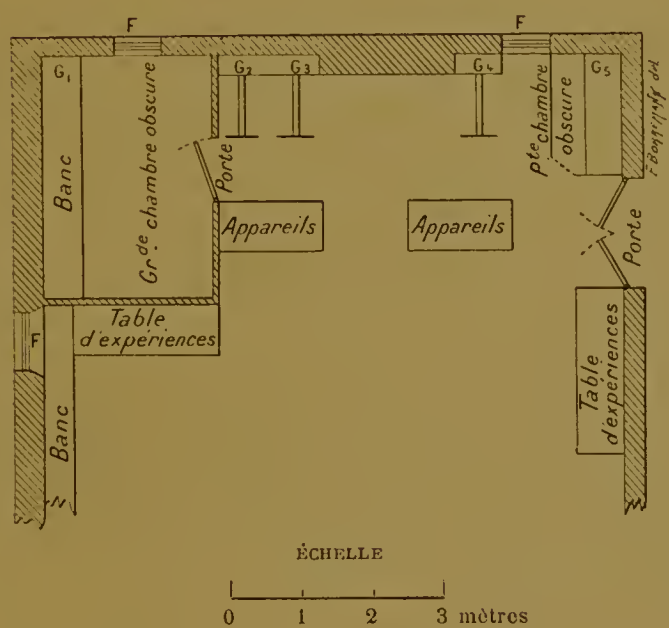


Fig. 10.

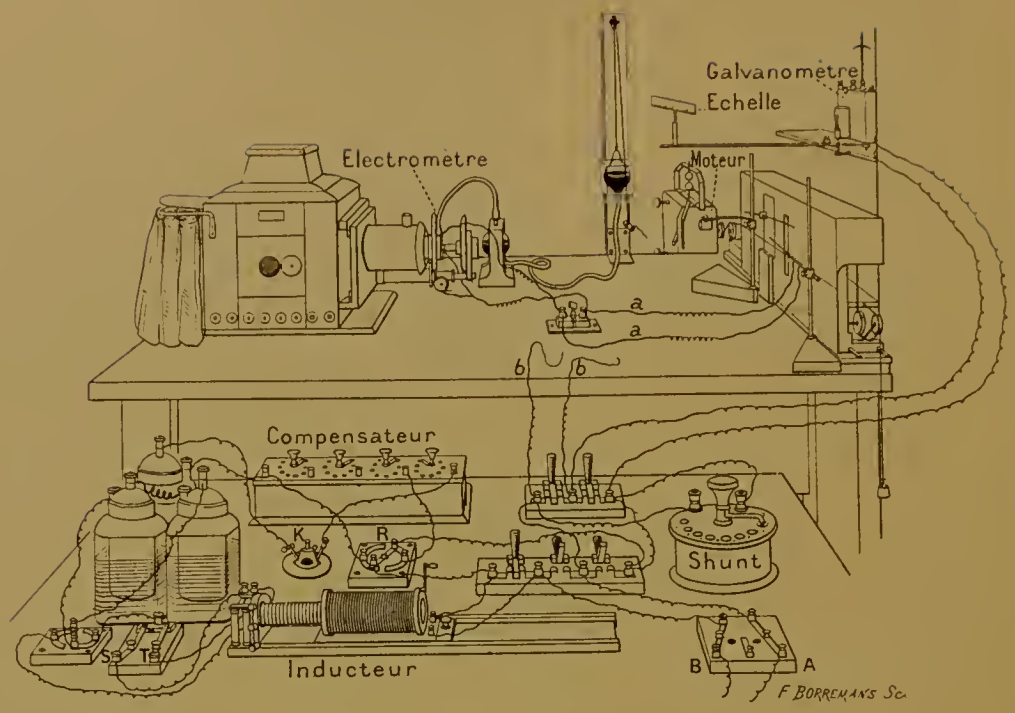


Fig. 11. — Disposition des tables par rapport à un électromètre et un galvanomètre. Les appareils appartenant à l'électromètre sont disposés sur la table supérieure, les accessoires, clefs, compensateur, shunt, bobine, etc., sont arrangés sur la table inférieure. Le galvanomètre et l'échelle sont indiqués à droite. L'image de l'électromètre est projetée sur une fente verticale de l'appareil enregistreur. Les leviers d'un chronographe et d'un cardiographe projettent leurs ombres sur la même fente. Le cœur, ou tout autre tissu électromobile, est joint aux pôles de l'électromètre au moyen d'une clef indiquée au milieu de la table. Les appareils accessoires de la table inférieure peuvent être joints à l'électromètre au moyen d'une paire de fils *bb* de la double clef mise en place des fils *aa*. La table inférieure montre, en perspective, les parties essentielles de l'appareil dont le diagramme est donné dans la figure 1. La bobine primaire de l'inductorium est servie par deux Leclanchés à travers un inverseur de courant et une double clef. Le but de la double clef est d'avoir, à volonté, des chocs uniques (S) ou des courants tétanisants (T). Une troisième pile Leclanché, derrière ces deux, nourrit le compensateur. Sa clef (K) est dans le circuit principal; son inverseur (R) est dans le circuit partiel qui se termine aux deux extrémités de la clef à trois chevilles, dont les trois paires de fils sont jointes (1) à la bobine secondaire (2), à la clef ABC, etc. (3), avec la clef à deux chevilles, dont les fils passent au galvanomètre, ou bien par *bb*, à l'électromètre. Enfin, la préparation est jointe aux deux bornes AB de la clef ABC : la borne centrale n'est pas en emploi dans ce dessin.

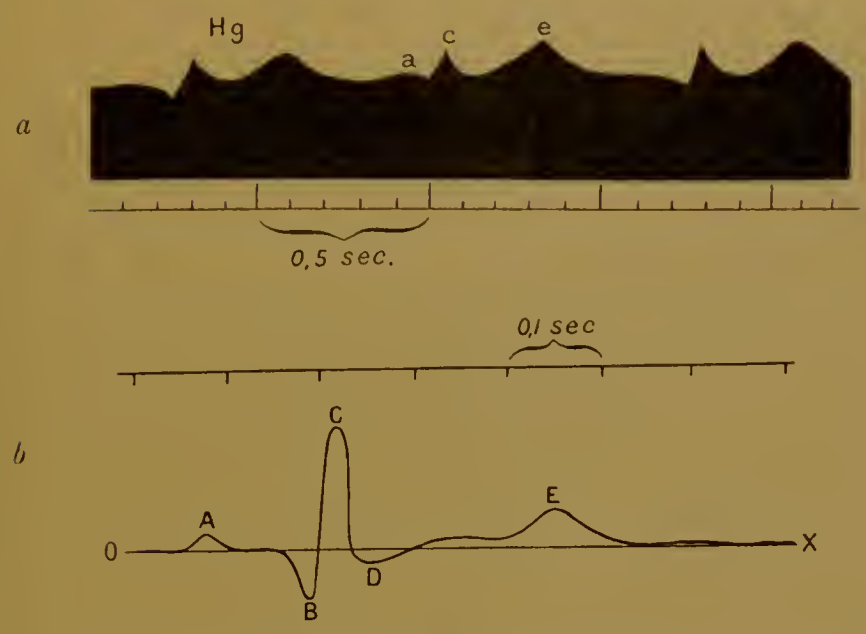


Fig. 12. — *a*. Electrocardiogramme normal de l'homme. Dérivation de la main droite au mercure et de la main gauche à l'acide sulfurique de l'électromètre capillaire de Lippmann. — *b*. Construction d'une courbe corrigée pour une seule systole cardiaque. Les majuscules et minuscules se correspondent dans les deux figures.

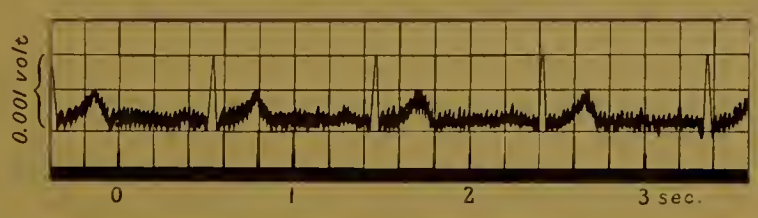


Fig. 13. — Électrocardiogramme inscrit au moyen du galvanomètre du professeur Einthoven.

NOTE SUR LA "MYRIOTONIE"

Présentée à l'Association de l'Institut Marey

(Séance du 30 août 1904)

Par M. L. ERRERA

M. Errera, sur l'invitation de M. le Président, défend une proposition d'unification des mesures osmotiques.

Depuis l'adoption de la théorie de Van't Hoff, il importe, dit-il, d'exprimer, par les mêmes unités, les pressions osmotiques et les pressions gazeuses. Mais l'*atmosphère*, employée ordinairement pour ces dernières, est une unité tout à fait arbitraire et irrationnelle et, de plus, variable avec g, par conséquent avec la latitude géographique. Dès lors, il semble tout indiqué de se servir des « unités absolues » du système C.G.S.

L'unité de force, ou *dyne*, est ici la force qui donne à la masse de 1 gramme une accélération de 1 centimètre par une seconde. L'unité de *pression* ou d'*effort* sera donc la pression de une dyne par centimètre carré. C'est cette unité, ou un de ses multiples, que M. Errera a proposé (*Report British Association for*, 1898) d'adopter pour les pressions osmotiques et les pressions gazeuses, et il lui a donné (*Bulletin Acad. roy. Belgique*, Cl. des Sciences, mars 1901) le nom de *tonie* (τόνος, effort, tension). La tonie étant une unité très petite, il convient de se servir pour l'usage habituel de l'un de ses multiples : la *myriotonie* (=10.000 tonies), qu'on peut représenter par l'abréviation $\overset{\tau}{M}$ (un M surmonté d'un τ grec) et qui correspond, grossièrement, à $7^{mm},5$ de mercure ou $\frac{1}{100}$ d'atmosphère environ.

En effet, on calcule aisément que l'atmosphère moyenne (c'est-

à-dire à 45 degrés de latitude) = 1.013.256 tonies = 101,33 myriotonies = 1,01 mégatonie.

L'équation fondamentale des solutions : $pv = i\mathrm{RT}$, devient alors :

$$P_M v_{\text{litres}} = 8{,}32.i.T.$$

On en déduit que, pour obtenir à 18 degrés une pression osmotique de 1 myriotonie, il faut dissoudre 1 *molécule* de KNO_3, par exemple (= 101 gr. 19) dans *4810 litres* d'eau pure.

Plusieurs années d'emploi ont montré à M. Errera que cette unité est très commode pour tous les calculs osmotiques.

On peut ajouter qu'une proposition de M. Ch. Ed. Guillaume (*Report British Association* pour 1901, p. 71), un peu postérieure à celle de M. Errera, coïncide essentiellement avec elle.

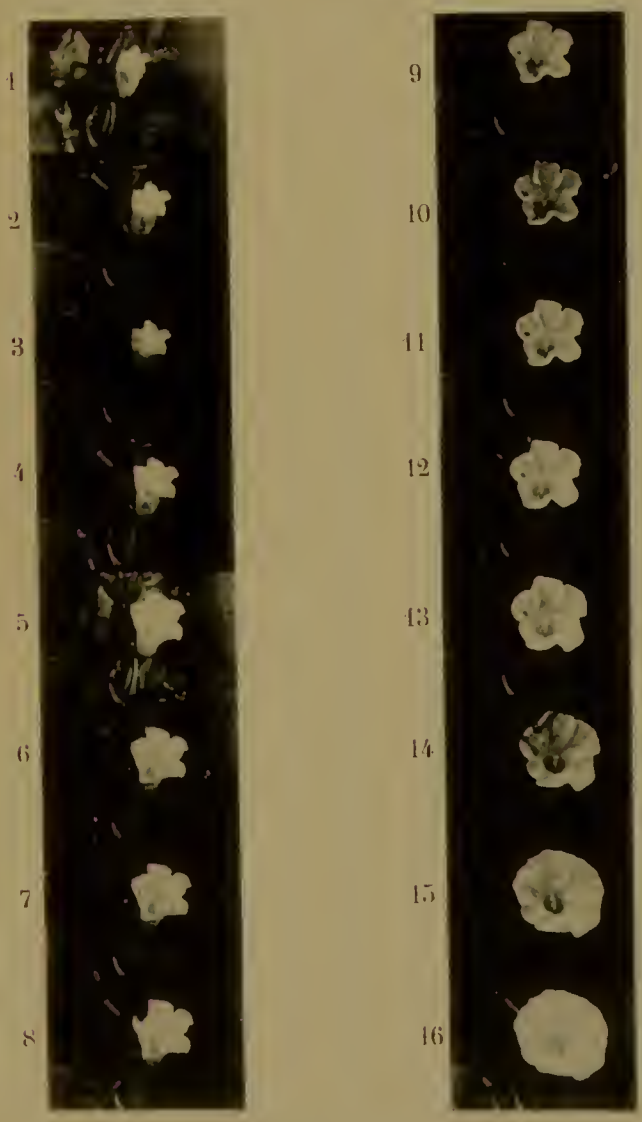
Voir aussi Lehfeldt (*Philos. Magaz.* (6), avril 1901, p. 401).

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 1
Décret accordant à l'Institut Marey la reconnaissance d'utilité publique . . 3
Statuts 4
Liste des membres 7
Liste des donateurs 8
Distribution de l'Institut Marey 10
E.-J. Marey, par H. Kronecker 13
Méthode graphique, par J. Athanasiu 29
Galvanométrie et Galvanographie, par A.-D. Waller 125
Note sur la « Myriotonie », par M. L. Errera 147

Paris. — L. Maretheux, imprimeur, 1, rue Cassette. — 8656.

Fig. 82



Ouverture d'une fleur de Volubilis

Fig. 83

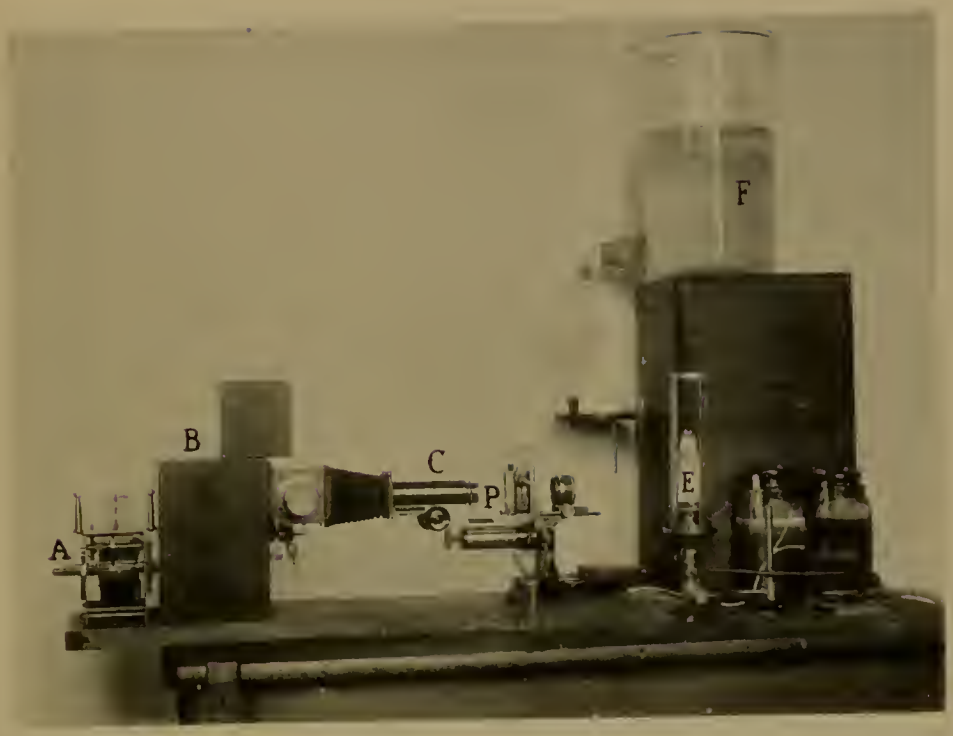
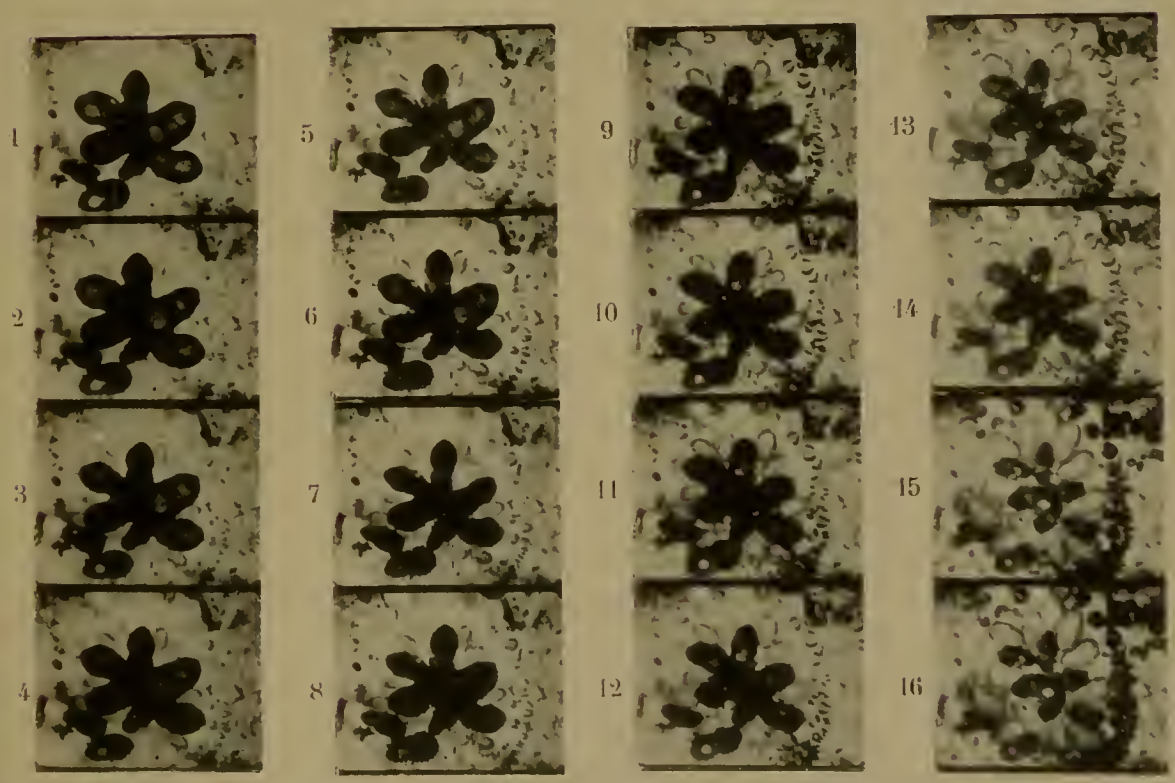


Fig. 84



Reproduction d'une colonie de Botrylles

Fig. 85

Masson et Cie, Editeurs

Phototypie Berthaud, Paris

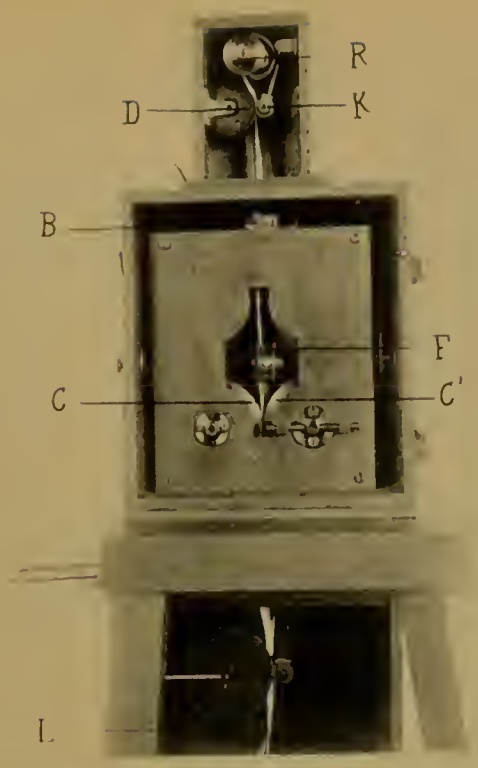
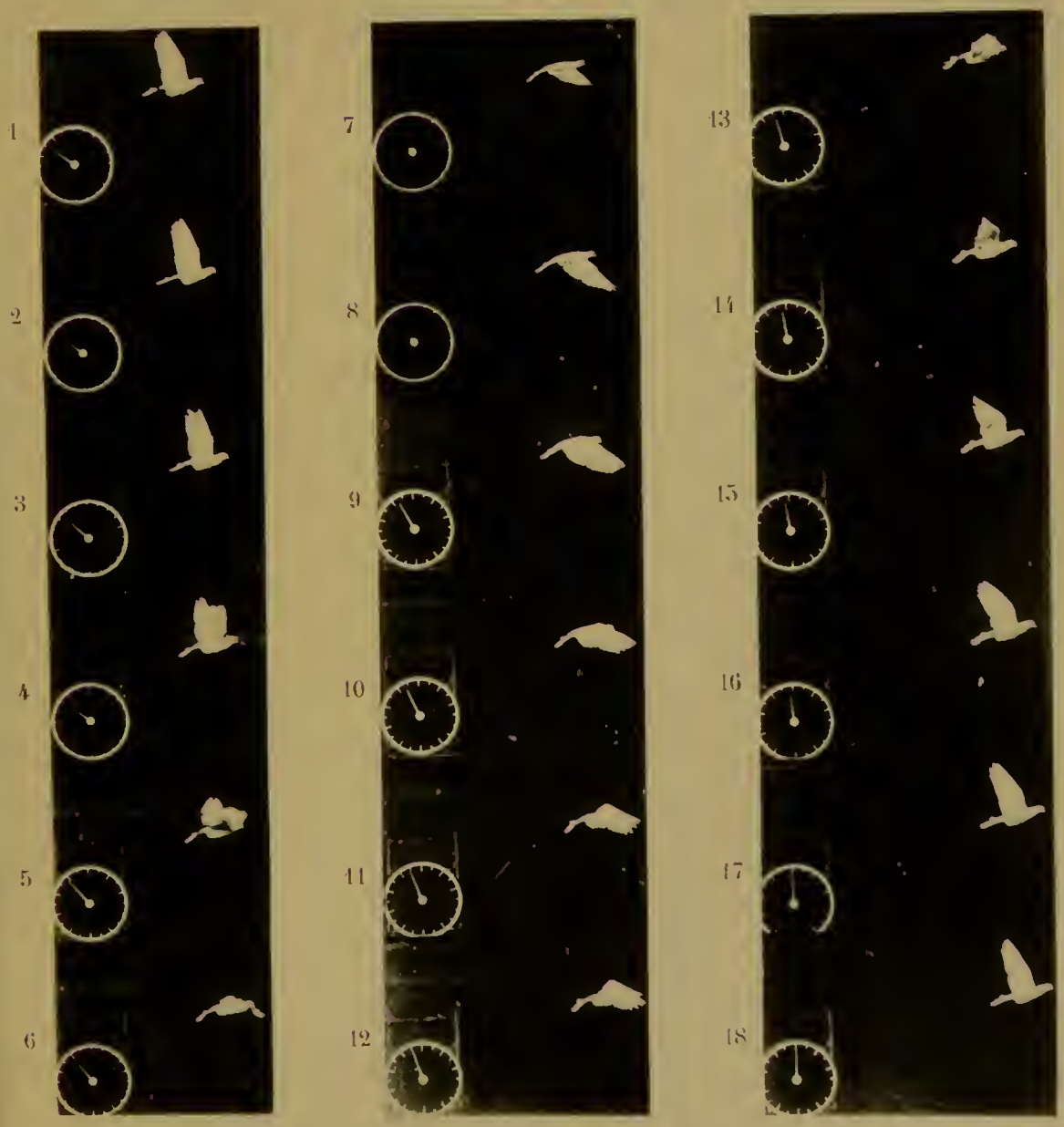


Fig. 86



Un coup d'ailes du pigeon.

Fig. 87

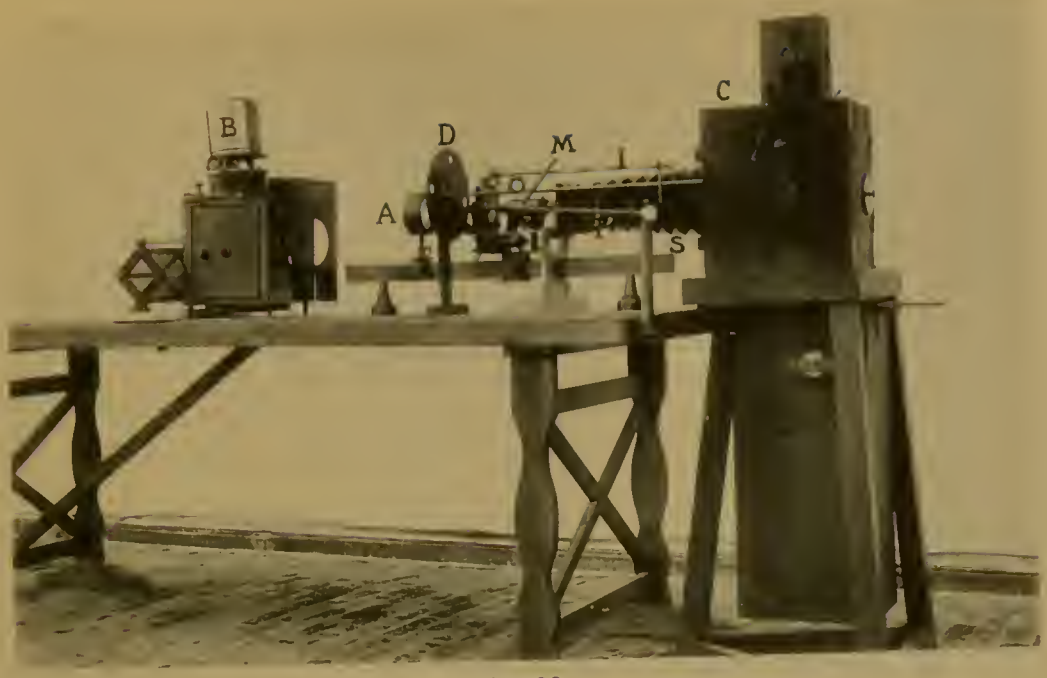


Fig. 88

Mouvements des cilles vibratiles du manteau de la moule

Fig. 89

Masson et Cie, Editeurs

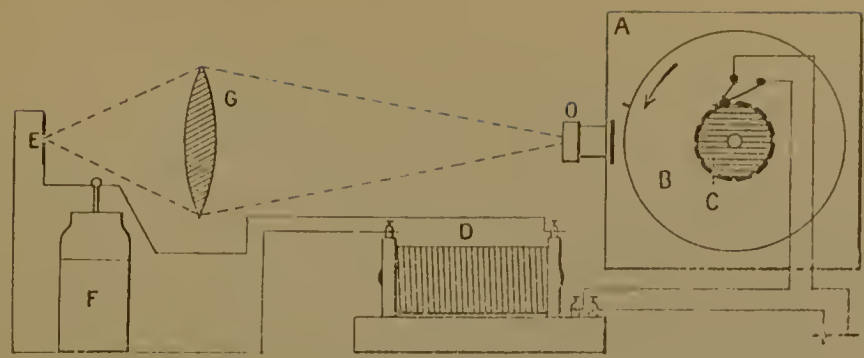


Fig. 90

Locomotion du Têtard — Locomotion de Notonecta glauca — Mouvements des ailes de Libellule — Rupture d'une bulle de savon par un projectile

Fig. 91

122